



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Diseño de una torre de viento para generar confort
térmico en una casa del estado de Morelos**

presentada por

Ing. Erick Gabriel Ortiz Salvador

como requisito para la obtención del grado de
**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Directora de tesis

Dra. Sara Lilia Moya Acosta

Codirector de tesis

Dr. Rafael Campos Amezcua

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2026.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 27/noviembre/2025

Oficio No. SAC/274/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ERICK GABRIEL ORTIZ SALVADOR
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Diseño de una torre de viento para generar confort térmico en una casa del estado de Morelos"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

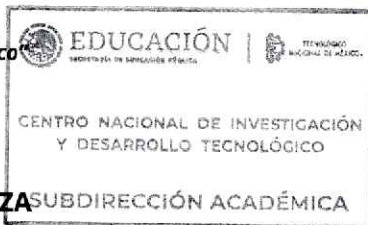
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., 19/noviembre/2025
OFICIO No. DIM/214/2025
Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Erick Gabriel Ortiz Salvador con número de control M21CE002, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Diseño de una torre de viento para generar confort térmico en una casa del estado de Morelos"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Directora de tesis

Dr. Rafael Campos Amezcua
Codiirector de tesis

Dr. José Jassón Flores Prieto
Revisor 1

Dr. Miguel Angel Chagolla Aranda
Revisor 2

Dr. Alfonso Aragón Aguilar
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2108,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico



Dedicatorias

A Dios, a mi hijo Dylan Emanuel Ortiz Rios.

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera muy especial:

A mi asesora la Dra. Sara Lilia Moya Acosta por su voto de confianza directo en mi trabajo antes que nadie más, por su apoyo incondicional.

A mi codirector el Dr. Rafael Campos Amezcua por la enseñanza, paciencia y dedicación.

Al Dr. Luis Guillermo Carreto Hernandez por su apoyo y confianza en el esfuerzo diario para conseguir un objetivo.

Al Dr. Ariel Francisco Hernandez por la enseñanza y el apoyo brindado.

Al M.C. Eder Gibrain Ricoy Zárata por su colaboración y apoyo.

Al ingeniero José de Jesús Quiñones Aguilar encargado de la ESOLMET-IER-UNAM por proporcionar datos meteorológicos importantes para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A mis revisores, al Dr. Jose Jassón Flores Prieto, Dr. Miguel Angel Chagolla Aranda y Dr. Alfonso Aragón Aguilar, expreso mi más sincero agradecimiento por el tiempo y la dedicación destinados a la revisión detallada del presente trabajo, así como por las valiosas observaciones y sugerencias que aportaron de manera significativa a su fortalecimiento y mejora.

Al centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico (CENIDET) por su creencia en los estudiantes de cualquier parte del país para desarrollar investigación de calidad y por desarrollar este espacio para la ciencia.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por el apoyo económico a lo largo del desarrollo de este trabajo porque sin su apoyo no podría haber sido posible.

Expreso mi más sincero agradecimiento a cada uno de ustedes por su apoyo y valiosa contribución.

Resumen

Se evalúa mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) la factibilidad de implantación de una torre de viento (TV) en una casa de Temixco, Morelos, como estrategia pasiva de ventilación natural destinada a optimizar la ventilación y el confort térmico en interior de los ocupantes. Uno de los principales problemas actuales es el aumento del consumo energético a nivel mundial, derivado en gran medida del uso excesivo de sistemas eléctricos de climatización, como ventiladores y aires acondicionados. Muchas construcciones no consideran variables clave como la orientación solar, la dirección e intensidad del viento, la temperatura, la humedad y las propiedades térmicas de los materiales, lo que resulta en viviendas térmicamente ineficientes. En este contexto, se retoman tecnologías tradicionales del Medio Oriente, como las torres de viento (*captadores de viento*), que son estructuras verticales que captan los vientos predominantes de una localidad, incrementan su velocidad a través de los canales de captación y dirigiéndolos al interior de los edificios, mejorando así el confort térmico de sus ocupantes sin recurrir a energía eléctrica. En la revisión del estado del arte se identificó una evolución en su estudio, desde investigaciones experimentales que demostraron su viabilidad tecno-económicas, hasta diseños optimizados mediante CFD, así como aplicaciones contemporáneas orientadas a la sostenibilidad energética. Estas investigaciones reportan reducciones de temperatura de hasta 15 °C cuando se incorpora además enfriamiento evaporativo en la torre. Incrementos del caudal de ventilación en el orden del 50 % y ahorros energéticos superiores al 30 %, confirmando la eficiencia de este sistema en climas cálidos y secos. El presente trabajo consistió en diseñar y evaluar una torre de viento integrada a la vivienda bajo condiciones de verano. Previo al estudio CFD con TV se realizó un trabajo numérico-experimental para validar la metodología numérica empleada y establecer las condiciones de referencia, tanto termohidráulicas como de ventilación y confort térmico. Primeramente se realizaron simulaciones numéricas con el software ANSYS Fluent, utilizando el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable, con el objeto de analizar las zonas críticas en cuanto a la distribución e intensidad del flujo de aire, así como la distribución de temperaturas dentro de la vivienda. Con base en los resultados de las simulaciones numéricas y en la información proporcionada por los residentes de la vivienda, se determinó que la habitación ubicada al sur, en el segundo piso, presentaba las condiciones más críticas tanto en términos de ventilación como de confort térmico. Los datos meteorológicos del Instituto de Energías Renovables de la UNAM permitieron establecer las condiciones de frontera para la entrada de aire en la TV resultando vientos predominantes del sur con una velocidad promedio de 2.1 m/s. En la fase experimental, se desarrolló un sistema de adquisición de datos basado en Arduino, equipado con sensores de temperatura DS18B20, de humedad DHT22 y un anemómetro. Las mediciones realizadas en la habitación de la vivienda confirmaron que los muros orientados al sur y el techo corresponden a las zonas con mayor acumulación de energía térmica, lo que validó la necesidad de incorporar una torre de viento para la remoción de calor mediante efecto de la ventilación natural. Los parámetros de confort térmico considerados son el Voto Medio Predicho (PMV), por sus siglas en inglés y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD), por sus siglas en inglés. El primero debe mantenerse dentro del rango de -0.5 a 0.5 y el segundo debe ser menor al 10 %; de acuerdo con la norma ASHRAE Standard 55. El parámetro de ventilación considerado es el número de Cambios de Aire por Hora (ACH), por sus siglas en inglés, el cual, de acuerdo con la norma ASHRAE Standard 62.2, debe mantenerse dentro del intervalo de 60–70 ACH. Los resultados de la simulación numérica de la habitación sin torre de viento indican un ACH de 31.37, un PMV de 0.66 y un PPD de 13.86 %, por lo que la habitación en condición actual no satisface las condiciones de confort térmico y ventilación. Por otro lado, al incorporar la torre de viento, el ACH se incrementa a 65.23 ACH, el valor de PMV disminuye a 0.26 y el PPD disminuye a 6.12 %; estos parámetros establecen buenas condiciones de ventilación y de confort térmico por lo que no es necesario disminuir la temperatura

agregando medios humidificantes. En conclusión, el estudio demuestra que incorporando una TV a la casa bajo estudio, se obtendrían condiciones de confort, representando una solución bioclimática eficiente y sostenible.

Abstract

The feasibility of implementing a wind tower (WT) as a passive natural ventilation strategy aimed at improving indoor ventilation and thermal comfort in a dwelling located in Temixco, Morelos (Mexico) is evaluated using Computational Fluid Dynamics (CFD). One of the main current problems is the increase in global energy consumption, largely driven by the excessive use of electrical air-conditioning systems such as fans and air conditioners. Many buildings do not consider key variables such as solar orientation, wind direction and intensity, temperature, humidity, and the thermal properties of construction materials, resulting in thermally inefficient housing. In this context, traditional Middle Eastern technologies, such as wind towers (*badgirs*), are revisited. These are vertical structures that capture the prevailing winds of a given location, increase their velocity through intake channels, and direct them into the interior of buildings, thereby improving occupants' thermal comfort without the use of electrical energy. The state-of-the-art review identified an evolution in wind tower research, ranging from experimental studies that demonstrated their feasibility to optimized designs developed using CFD, as well as contemporary applications focused on energy sustainability. These studies report temperature reductions of up to 15 °C when evaporative cooling is additionally incorporated into the tower. Furthermore, increases in ventilation airflow on the order of 50 % and energy savings exceeding 30 % are reported, confirming the efficiency of this system in hot and dry climates. The present work consisted of designing and evaluating a wind tower integrated into the dwelling under summer conditions. First, numerical simulations were performed using the ANSYS Fluent software, employing the realizable k - ε turbulence model, in order to analyze critical zones in terms of airflow distribution and intensity, as well as indoor temperatures. Based on the results of the numerical simulations and the information provided by the dwellings occupants, it was determined that the room located on the south side of the second floor exhibited the most critical conditions in terms of both ventilation and thermal comfort. Meteorological data from the Instituto de Energías Renovables of UNAM were used to establish the boundary conditions, considering prevailing southern winds with an average velocity of 2.1 m/s. In the experimental phase, a data acquisition system based on Arduino was developed, equipped with DS18B20 temperature sensors, DHT22 humidity sensors, and an anemometer. Measurements carried out in the room confirmed that the south-oriented walls and the roof correspond to the zones with the highest thermal energy accumulation, which validated the need to incorporate a wind tower for heat removal through natural ventilation. The thermal comfort parameters considered were the Predicted Mean Vote (PMV) and the Percentage of People Dissatisfied (PPD). The PMV must remain within the range of -0.5 to 0.5 , and the PPD must be lower than 10 %, according to ASHRAE Standard 62.2. The ventilation parameter considered was the air changes per hour (ACH), which, according to this standard, should be maintained within the range of 60–70 ACH. The numerical simulation results for the room without the wind tower indicate an ACH of 31.37, a PMV of 0.66, and a PPD of 13.86 %; therefore, under its current condition, the room does not satisfy the thermal comfort and ventilation requirements. On the other hand, when the wind tower is incorporated, the ACH increases to 65.23 ACH, the PMV value decreases to 0.26, and the PPD to 6.12 %. These parameters indicate that it is not necessary to incorporate humidification mechanisms to achieve thermal comfort. In conclusion, the study demonstrates that wind towers represent an efficient and sustainable bioclimatic solution.

Índice general

Nomenclatura	12
1. Introducción	15
1.1. Concepto de torre de viento	15
1.2. Sistemas de torre de viento	16
1.3. Estado del arte	19
1.3.1. Estudios experimentales	19
1.3.2. Innovaciones geométricas	20
1.3.3. Aplicaciones en edificaciones	21
1.3.4. Eficiencia energética y sostenibilidad	22
1.3.5. Síntesis y discusión relaciona	22
1.3.6. Conclusiones del estado del arte	26
1.4. Objetivos y alcances	27
1.4.1. Objetivo general	27
1.4.2. Objetivos específicos	28
1.4.3. Alcances	28
1.5. Metodología general	28
1.6. Contenido de la tesis	29
2. Marco teórico	30
2.1. Caso de estudio	30
2.1.1. Descripción de la casa y área de estudio	30
2.1.2. Análisis de datos meteorológicos	31
2.1.3. Modelos geométricos en CAD	34
2.2. Modelos matemáticos	36
2.2.1. Ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos	37
2.2.2. Generalidades del Software ANSYS Fluent	39
2.3. Eficiencia de la ventilación	40
2.3.1. Cambios de aire	40
2.4. Confort térmico	40
2.4.1. Voto medio predicho (PMV)	40
2.4.2. Porcentaje predicho de personas insatisfechas (PPD)	41
3. Metodología experimental	43
3.1. Protocolo experimental	43
3.1.1. Algoritmo	43
3.1.2. Diagrama de flujo	43
3.1.3. Características de los instrumentos de medición y materiales	44
3.2. Desarrollo experimental preliminar	47
3.2.1. Descripción del experimento	47

3.2.2. Calibración de sensores	48
3.2.3. Prueba del sistema adquisidor de datos	50
4. Estudio experimental y numérico del flujo de aire en la habitación	53
4.1. Estudio experimental	53
4.1.1. Equipo, materiales e instrumentación	53
4.1.2. Programación del sistema adquisidor	54
4.1.3. Construcción de la tarjeta adquisidora de datos	56
4.1.4. Resultados experimentales	60
4.2. Estudio numérico	63
4.2.1. Modelo físico	63
4.2.2. Discretización del volumen de control	64
4.2.3. Modelo matemático	64
4.2.4. Establecimiento de las condiciones de frontera	64
4.2.5. Análisis de independencia de malla	65
4.3. Validación	67
4.4. Resultados numéricos	68
4.4.1. Análisis de ventilación y confort térmico	68
5. Estudio numérico del flujo de aire sin/con torre de viento	72
5.1. Modelos físicos	72
5.2. Establecimiento de las condiciones de frontera	73
5.3. Resultados sin torre de viento	74
5.3.1. Discusión del comportamiento dinámico	74
5.3.2. Discusión del comportamiento térmico	75
5.3.3. Resultados con torre de viento	78
5.3.4. Discusión del comportamiento dinámico	78
5.3.5. Discusión del comportamiento térmico	79
5.4. Conclusiones	81
6. Conclusiones generales y recomendaciones	82
6.1. Conclusiones	82
6.2. Recomendaciones para trabajos futuros	83

Índice de figuras

1.1. TV de una sola ventana en Tabas [34]	17
1.2. TV con dos ventanas de captación en Dowlat Abbad Garden [34]	17
1.3. TV en el Jardín Dowlat Abad en Yazd [34]	17
1.4. TV con ventanas de captación cilíndricas [34]	18
1.5. Esquema del funcionamiento de TV [5]	19
1.6. TV experimental en Yazd, Irán [2]	20
1.7. Diseños de TV [5]	21
1.8. TV incorporando tubos de calor [35]	22
1.9. Metodología general	28
2.1. Planta alta de la propiedad	30
2.2. Plano de la habitación	31
2.3. Estación Solarimétrica y meteorológica ESOLMET-IER-UNAM	31
2.4. Comportamiento de la temperatura ambiente en la ESOLMET-IER-UNAM de Verano 2018-2020	32
2.5. Comportamiento de la velocidad de viento en la ESOLMET-IER-UNAM de Verano 2018-2020	32
2.6. Dirección predominante promedio del viento en la ESOLMET-IER-UNAM de Verano 2018-2020	33
2.7. Modelo CAD fachada principal	34
2.8. Modelo CAD del segundo nivel de la casa de estudio fachada trasera	35
2.9. Modelo CAD de la habitación de estudio	35
2.10. Modelo CAD de la habitación con TV	36
2.11. Estructura de trabajo de CFD [8]	39
2.12. PPD en función del PMV [27]	42
3.1. Diagrama de flujo del desarrollo experimental	44
3.2. Arduino UNO [41]	45
3.3. Arduino NANO [41]	45
3.4. Sensor DS18B20 [41]	46
3.5. Cable estañado 22 AWG 080-417 [41]	46
3.6. Módulo sensor de temperatura y humedad DHT22 [41]	47
3.7. Modelo CAD de la habitación preliminar	48
3.8. Pantalla principal de la herramienta PLX-DAQ	48
3.9. Mediciones con sensor LM35	49
3.10. Mediciones con sensor DS18B20	49
3.11. Equipo de cómputo	50
3.12. Conexiones con Arduino	50
3.13. Conexiones con los puntos de medición	51
3.14. Medición de temperatura y humedad preliminar	51

4.1. Código de variables de interés	54
4.2. Código de monitor serial	54
4.3. Código de almacenamiento de variables de interés	55
4.4. Código de captura de valores de las variables de interés	55
4.5. Topología de conexión bus 1-wire [41]	56
4.6. Configuración de conexión del sensor de temperatura DS18B20	56
4.7. Conexión tipo parásito del sensor DS18B20	57
4.8. Conexión pull up	57
4.9. Conexión DHT22 [41]	58
4.10. Esquemático del circuito en PROTEUS	59
4.11. Pistas para la construcción de la placa experimental	59
4.12. Visualización en 3D de la placa experimental	60
4.13. Ubicación de los sensores en la habitación experimental	60
4.14. (1) Instalación de sensor de temperatura (2) Instalación de sensor de velocidad (3) Prueba de medición de temperatura en el centro de la habitación (4) Ventana de entrada de viento	61
4.15. Comportamiento de la temperatura en la habitación experimental	62
4.16. Temperatura de las paredes en un estado cuasi-estacionario	62
4.17. Velocidad en la ventana de entrada en el estado cuasi-estacionario	63
4.18. Modelo físico	63
4.19. Discretización del dominio de control	64
4.20. Trazado de línea en el centro de la ventana de entrada para análisis de convergencia	65
4.21. Comportamiento de diferentes tamaños de malla	66
4.22. Campos de temperatura con puntos en centro de la habitación	67
4.23. Campos de velocidad en la habitación de estudio	69
4.24. Campos de PMV	71
4.25. Campos de PPD	71
5.1. Modelo físico desarrollado sin la implementación de una TV	72
5.2. Representación del modelo físico equipado con una TV	73
5.3. Campos de velocidad dentro de la habitación de estudio	75
5.4. Campos de PMV	77
5.5. Campos de PPD	77
5.6. Campos de velocidad con TV	79
5.7. Campos de PMV con TV	80
5.8. Campos de PPD con TV	81

Índice de Tablas

1.1. Tabla comparativa de investigaciones sobre TV (ordenada por método)	23
2.1. Promedios de datos meteorológicos en verano (2018-2020)	33
2.2. Escala de sensación térmica	41
3.1. Captura de datos de temperatura y humedad	52
4.1. Resultados de medición de temperatura y humedad	53
4.2. Valor de la resistencia pull up	58
4.3. Nomenclatura utilizada para cada sensor	61
4.4. Condiciones de frontera obtenidas experimentalmente	65
4.5. Análisis de independencia de malla	66
4.6. Comparativa de resultados numéricos y experimentales	67
4.7. Datos de ventilación	69
5.1. Propiedades de los materiales de acuerdo con la norma [29]	73
5.2. Condiciones de frontera térmicas de acuerdo con la norma [29] y dinámicas de acuerdo con datos de la estación meteorológica ESM-IER-UNAM.	74
5.3. Datos de ventilación	75
5.4. Cambios de aire por hora dentro de la habitación	79

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
ACH	Cambios de aire por hora (<i>Air Changes per Hour</i>)	h^{-1}
α	Exponente del perfil de velocidad (ley de potencia del viento)	
β	Coeficiente de expansión térmica del aire	K^{-1}
C_μ	Constante empírica del modelo k - ε realizable ($C_\mu = 0,09$)	
C_p	Calor específico a presión constante	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ε	Tasa de disipación de energía cinética turbulenta	m^2/s^3
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
G_b	Generación de energía cinética turbulenta por flotación	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$
G_k	Generación de energía cinética turbulenta por gradientes de velocidad	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^3)$
h_1, h_2	Alturas de referencia y de medición del viento	m
HR	Humedad relativa del aire	%
k	Energía cinética turbulenta	m^2/s^2
λ	Conductividad térmica del aire	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
L	Balance térmico del cuerpo humano	W/m^2
M	Tasa metabólica	W/m^2
μ	Viscosidad dinámica	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ_t	Viscosidad turbulenta	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
P	Presión estática	Pa
PMV	Voto Medio Predicho (<i>Predicted Mean Vote</i>)	
PPD	Porcentaje Predicho de Personas Insatisfechas (<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>)	%
Q	Caudal volumétrico de aire	m^3/s
q	Flujo de calor o transferencia térmica	W/m^2
ρ	Densidad del fluido	kg/m^3
Re	Número de Reynolds ($Re = \frac{\rho UL}{\mu}$)	
S_k, S_ε	Términos fuente de las ecuaciones de k y ε	

S	Tasa de deformación del esfuerzo cortante	s^{-1}
t	Tiempo	s
T	Temperatura	K
T_0	Temperatura de referencia	K
ΔT	Diferencia de temperatura	K
τ	Esfuerzo cortante	Pa
u_i, u_j, u_k	Componentes del vector velocidad (x, y, z)	m/s
U	Magnitud promedio de la velocidad del flujo	m/s
U_0	Velocidad de referencia del viento a la altura meteorológica	m/s
$\vec{v}$	Vector velocidad del fluido	m/s
V	Volumen del recinto o dominio de flujo	m^3
v_1, v_2	Velocidades del viento en diferentes alturas	m/s
W	Potencia o trabajo realizado por unidad de tiempo	W
θ	Temperatura potencial, o ángulo de incidencia del flujo (según contexto)	K, o °
∇	Operador nabla (gradiente o divergencia)	
Φ	Función escalar general (variable dependiente)	
ω	Frecuencia angular o velocidad rotacional	rad/s

Subíndices y superíndices

i, j, k	Direcciones cartesianas (x, y, z)
t	Indica variable turbulenta o dependiente del tiempo
0	Valor de referencia o condición inicial
in, out	Entrada y salida del dominio de flujo

Acrónimos y siglas

ANSYS	Software de simulación CFD
Fluent	
AWG	American wire gauge
NOM-020-ENER-2011	Norma mexicana de eficiencia energética en edificaciones
ESOLMET-IER-UNAM	Estacion solaritmetrica y meteorologica del instituto de energías renovables de la UNAM
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
PLX-DAQ	Interfaz de adquisición de datos para Excel
PVC	Polyvinyl chloride

PWM	Pulse Width Modulation
ICSP	In circuit serial programming
CIICAp UAEM	Centro de investigación en ingeniería y ciencias aplicadas de la Universidad Auntonoma del estado de Morelos
DS18B20	Sensor digital de temperatura
DHT22	Sensor digital de temperatura y humedad relativa
RANS	Promedio de Reynolds de las ecuaciones de Na- vierStokes
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (<i>Computatio- nal Fluid Dynamics</i>)
PIV	Velocimetría por Imagen de Partículas (<i>Particle Image Velocimetry</i>)
TV	Torre de viento

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad han surgido diversos desafíos relacionados principalmente con el aumento en el consumo de electricidad, fenómeno que, en parte, está vinculado al cambio climático, el cual ha provocado un incremento en las temperaturas globales. La adopción de fuentes de energía renovable para producir electricidad limpia no ha sido suficiente, debido a la elevada demanda energética y a las dificultades asociadas con el almacenamiento de energía en baterías. Uno de los problemas clave es el mantenimiento del confort térmico dentro de los edificios, ya que la mayoría de los usuarios recurre a sistemas de ventilación mecánica y aires acondicionados eléctricos, los cuales consumen grandes cantidades de energía. En este contexto, se busca implementar soluciones de climatización respetuosas con el medio ambiente, capaces de garantizar el confort térmico en los edificios con un consumo energético mínimo.

1.1. Concepto de torre de viento

Los badgirs, como eran conocidos por los persas, son estructuras arquitectónicas antiguas que consisten en torres verticales diseñadas para capturar los vientos predominantes de una región mediante canales ubicados en la parte superior, redirigiéndolos hacia el interior de los edificios y mejorando el confort térmico de sus ocupantes. Estas TV han sido utilizadas durante siglos, tanto en el pasado como en la actualidad, en áreas del Medio Oriente y Egipto, donde predomina un clima cálido y seco. El buen desempeño de una TV depende en gran medida de un adecuado análisis de las condiciones climáticas, como la velocidad, dirección y frecuencia del viento, así como la temperatura y la humedad relativa. En Irán, especialmente, los edificios con TV no solo son valorados por su funcionalidad, sino también por su belleza estética y arquitectónica. Las TV pueden adoptar diversas formas y tamaños, y en las ciudades del sur de Irán, por ejemplo, es común encontrar TV con diferentes secciones transversales.

1.2. Sistemas de torre de viento

Existen diferentes tipos de TV, que se clasifican según su forma y el número de ventanas de captación, las cuales pueden ser de dos ventanas, cuatro, seis u ocho. Además, dichas ventanas pueden tener forma cilíndrica o cuadrada, dependiendo del estudio realizado y de los materiales disponibles al momento de su construcción.

- Una ventana de captación Se encuentra principalmente en áreas donde el viento sopla predominantemente en una sola dirección, y suele construirse cerca del mar debido a las fuertes corrientes de viento que se presentan en las provincias de Yazd, Irán, como Ardakan, Meybod, Isfahan, Tabas y Aghda, ver Fig. 1.1. Una de sus principales ventajas es que su construcción se realiza a alturas más bajas, lo que las hace más económicas, ya que se ahorra material de construcción. Además, al contar con una sola abertura de captación, su tamaño es reducido, lo que también representa un ahorro considerable de espacio.
- Dos ventanas de captación También se les denomina torres de viento dobles, ver Fig. 1.2, ya que poseen dos aberturas de captación orientadas en la misma dirección. En comparación con las TV de una sola abertura, resultan más eficientes y funcionales.
- Cuatro, seis y ocho ventanas de captación Estas TV suelen ser más altas que las demás y se consideran estructuras de gran valor arquitectónico. Presentan una mayor complejidad constructiva debido a su tamaño y al número de aberturas. La altura y configuración de cada una dependen directamente de las condiciones climáticas del lugar donde se edifiquen. Se encuentran principalmente en ciudades ubicadas en regiones desérticas, como Yazd. Un ejemplo representativo de este tipo es la TV del Jardín Dowlat Abad de Yazd, ver Fig. 1.3, que ha evolucionado arquitectónicamente con el paso del tiempo y cuya belleza ha sido admirada a lo largo de la historia de Irán.
- Ventanas de captación cilíndricas Su desempeño es más eficiente desde el punto de vista aerodinámico, lo que las hace más efectivas que otros tipos. No obstante, su construcción era compleja y requería arquitectos con gran experiencia, motivo por el cual se edificaron en pocas ocasiones. Por esta razón, solo se encuentran en algunas regiones de Irán, ver Fig. 1.4.



Figura 1.1 TV de una sola ventana en Tabas [34]

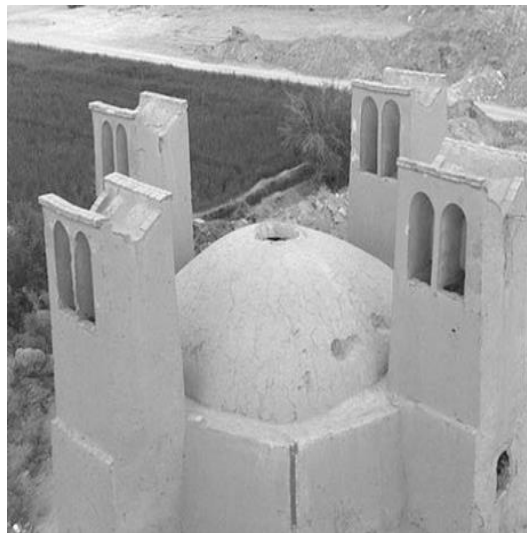


Figura 1.2 TV con dos ventanas de captación en Dowlat Abad Garden [34]



Figura 1.3 TV en el Jardín Dowlat Abad en Yazd [34]



Figura 1.4 TV con ventanas de captación cilíndricas [34]

La ventilación natural depende del flujo de aire que entra y sale de un edificio sin el uso de sistemas mecánicos. La intensidad de este flujo depende de las diferencias de presión, la velocidad del viento y las aberturas disponibles. A continuación, se presenta una comparativa entre dos escenarios hipotéticos de una habitación, los cuales resultan sumamente relevantes para la comprensión de este fenómeno, así como su contraste con la aplicación de una TV.

Ventanas abiertas

- El aire entra y sale de manera pasiva.
- El flujo depende de la dirección y velocidad del viento exterior y de la diferencia de temperatura interna-externa (efecto chimenea).
- Las ventanas actúan como aberturas simples, pero la captación del viento es limitada, porque el viento que llega puede ser difuso o no incidir directamente sobre la abertura.

Vientos captados mediante una TV

- Este dispositivo orienta y canaliza el viento directamente hacia el interior.
- Al concentrar la energía del viento y dirigirla, se incrementa la diferencia de presión entre el interior y el exterior, lo que provoca un flujo de aire más intenso.
- Incluso si el viento exterior es moderado, al ser captado y guiado, su velocidad dentro del canal aumenta, lo que genera mayor ventilación en el interior.

En síntesis abrir ventanas deja que el aire entre de manera pasiva y dispersa. Usar TV dirige y concentra el flujo, aprovechando mejor la energía del viento, aumentando la ventilación natural, ver Fig. 1.5.

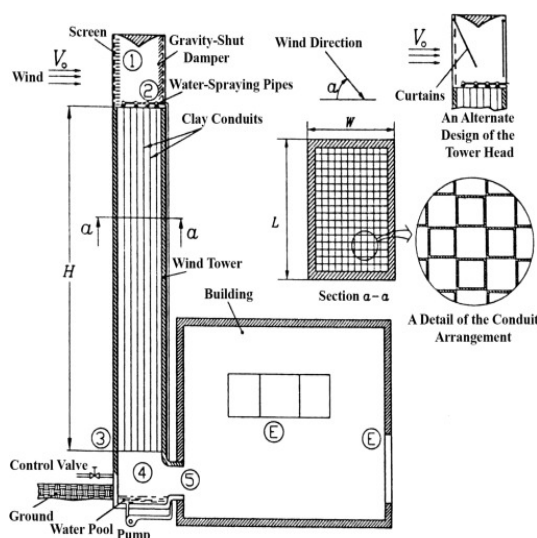


Figura 1.5 Esquema del funcionamiento de TV [5]

1.3. Estado del arte

En este apartado se presenta una revisión de investigaciones que abordan el diseño, funcionamiento y aplicaciones contemporáneas de las TV, con el fin de establecer una relación entre los distintos enfoques y avances reportados en la literatura en las siguientes secciones: Estudios experimentales, Innovaciones geométricas, Aplicaciones en edificaciones de contexto urbano así como Eficiencia energética y sostenibilidad.

1.3.1. Estudios experimentales

Las TV representan una de las soluciones de climatización pasiva más antiguas empleadas en regiones áridas y semiáridas. En la actualidad, su estudio ha adquirido relevancia debido a la creciente necesidad de estrategias sostenibles que reduzcan la dependencia de sistemas mecánicos de climatización y contribuyan a la mitigación del consumo energético en el sector de la edificación. Los estudios pioneros recientes se centraron en demostrar la viabilidad de las TV como sistemas de enfriamiento natural. Bahadori et al. (2008)[2] evaluaron el desempeño de nuevas configuraciones frente a TV convencionales, concluyendo que los diseños con superficies humedecidas resultan más efectivos en condiciones de baja velocidad de viento, mientras que los de columna húmeda presentan mejor rendimiento con flujos más intensos. En la misma línea, Kalantar et al. (2009)[9] realizaron un estudio experimental en Yazd, Irán, donde confirmaron que la incorporación de mecanismos de enfriamiento evaporativo puede reducir la temperatura interior entre 10 °C y 15 °C, incluso en condiciones de viento nulo, debido a la convección inducida por densidad. Asimismo, Bouchahm et al. (2011) [3] validaron mediante monitoreo experimental y modelado matemático la eficacia de una vivienda bioclimática con TV en Argelia, destacando que el sistema alcanza su mayor rendimiento en los días más cálidos

y secos, coincidiendo con la máxima demanda de refrigeración. Estos trabajos establecieron la base experimental y teórica que permitió justificar el potencial de las TV como sistemas de enfriamiento pasivo en climas cálidos y secos.

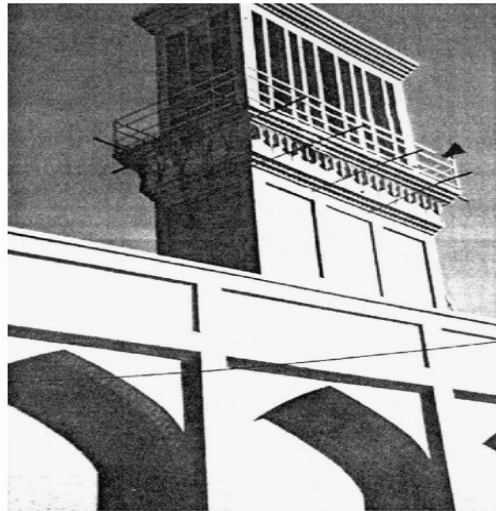


Figura 1.6 TV experimental en Yazd, Irán [2]

1.3.2. Innovaciones geométricas

Tras la validación inicial, la investigación se orientó hacia la optimización de la geometría y la mejora en los métodos de análisis. Afshin et al. (2016)[10], mediante estudios en túnel de viento a escala, demostraron que la ventilación es máxima cuando el viento incide perpendicularmente a la abertura de la TV, reduciéndose progresivamente conforme aumenta el ángulo de incidencia. Por su parte, Dehghani et al. (2015)[5] propusieron modelos con cabezales giratorios y materiales transparentes, destacando su aplicabilidad en edificaciones modernas. Nejat et al. (2016, 2021)[13, 14] introdujeron extensiones tipo alas y aleros superiores en las TV, mostrando incrementos de hasta un 50 % en la ventilación respecto a diseños tradicionales. Complementariamente, Varela y colaboradores (2020, 2021)[20, 21] evaluaron extensiones de entrada y salida mediante CFD, identificando mejoras promedio del 3.9 % al 7.5 % en el caudal de aire. En paralelo, Reyes et al. (2013, 2015)[16, 17] y Morales (2014)[24] en México consolidaron la aplicación combinada de CFD y experimentación en túnel de viento, confirmando la validez de la similitud dinámica entre escalas y resaltando la influencia de elementos como chaflanes y paredes curvas en la mejora de la distribución del flujo. Estos aportes fortalecieron el marco metodológico, ampliando la confiabilidad de los resultados en estudios posteriores.

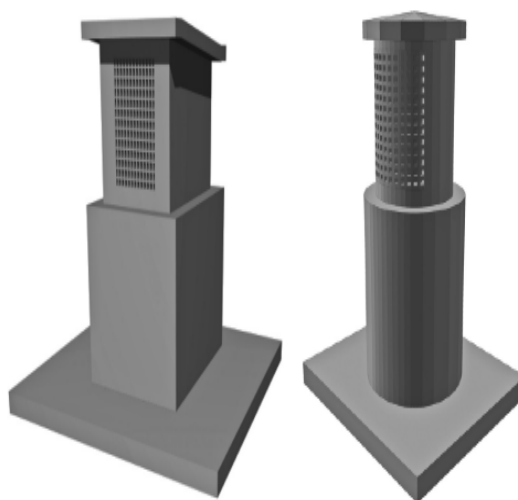


Figura 1.7 Diseños de TV [5]

1.3.3. Aplicaciones en edificaciones

La siguiente etapa de investigación trasladó el análisis al ámbito de edificaciones específicas y entornos urbanos. Moghaddam et al. (2011)[11] exploraron su aplicación en edificios públicos, concluyendo que las TV, combinadas con ventilaciones altas, permiten expulsar aire caliente acumulado y mejorar el enfriamiento nocturno. En el contexto de México, Francisco-Hernández (2021)[7] demostró la viabilidad de incorporar TV con humidificación en viviendas sociales en México, obteniendo beneficios energéticos y económicos frente al uso de aire acondicionado convencional. Asimismo, Flores (2021)[6] evaluó su integración en el edificio del CIICAp-UAEM, destacando la necesidad de diseñar configuraciones específicas para espacios académicos con gran ocupación. No obstante, estudios como el de Sadeghi et al. (2020)[18] evidenciaron que la eficiencia se reduce en aproximadamente un 25 % cuando la TV se encuentra rodeada de edificaciones, aunque el confort térmico se mantiene en niveles aceptables. Calautit et al. (2020)[4], por su parte, alertaron que la incorporación de tubos de calor puede mejorar la transferencia térmica, pero también generar disconfort debido a la elevada humedad relativa en el interior. Zhang et al. (2013, 2022)[23, 26] ampliaron el análisis hacia configuraciones urbanas y sistemas combinados, señalando que la disposición edilicia y la interacción con otras estrategias de ventilación natural determinan la estabilidad del flujo de aire y su rendimiento a largo plazo. Las extensiones de entrada son elementos geométricos que se adicionan a las TV para incrementar parámetros de ventilación en el trabajo de Sotelo et al. (2023)[40] realizaron un estudio numérico sobre la eficiencia de captación de aire en una TV, evaluando su comportamiento con y sin extensiones de entrada en la ventana de captación. El trabajo tuvo como propósito analizar cómo estas extensiones pueden mejorar la ventilación natural y el confort térmico en edificaciones sin recurrir a sistemas mecánicos de climatización.

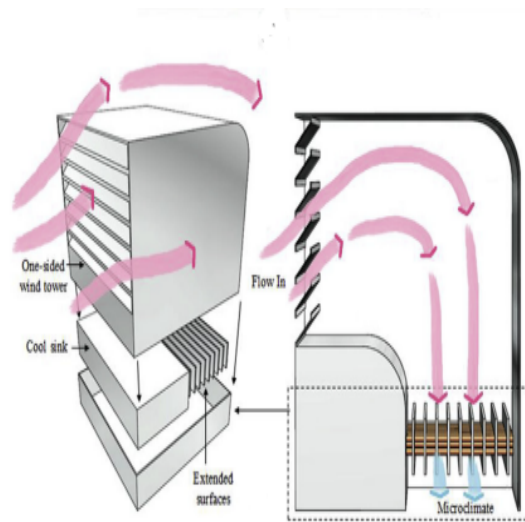


Figura 1.8 TV incorporando tubos de calor [35]

1.3.4. Eficiencia energética y sostenibilidad

Las investigaciones más recientes vinculan las TV con objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad. Nasrollahi et al. (2022)[15] identificaron parámetros óptimos de suministro de aire en salas de conferencias en Taiwán, asegurando condiciones de confort adaptativo con temperaturas entre 18 °C y 26 °C y velocidades de hasta 1 m/s. En un plano más aplicado, Alazazmeh et al. (2021)[12] reportaron un ahorro energético del 39 % en un edificio administrativo tras la rehabilitación con medidas de eficiencia, entre las que destacan las estrategias de ventilación natural. En paralelo, Santamouris et al. (2021)[25] abordaron la discusión en torno a la descarbonización del sector de la construcción, subrayando la relevancia de "tecnologías pasivas, como las TV" para cumplir los objetivos climáticos internacionales. De esta forma, los estudios recientes trascienden la escala arquitectónica y se posicionan en la agenda de la eficiencia energética, la reducción de emisiones y resiliencia urbana.

1.3.5. Síntesis y discusión relacional

La revisión de los artículos analizados permite establecer una evolución en la investigación:

- Etapa de validación experimental (2008-2011): trabajos de Bahadori et al. (2008)[2], Kallantar et al. (2009)[9] y Bouchahm et al. (2011) [3] confirmaron la viabilidad técnica de las TV en climas cálidos y secos.
- Etapa de optimización geométrica (2013-2016): aportes de Afshin et al. (2016)[1], Dehghani et al. (2015)[5], Nejat et al. (2016, 2021)[13, 14] y Varela (2020)[20] propusieron mejoras formales y metodológicas, consolidando el uso de CFD y trabajos experimentales.

- Etapa de aplicación en edificios y contexto urbano (2020-2021): estudios de Moghaddam et al. (2011)[11], Francisco Hernandez (2021)[7], Flores Salas (2021)[6], Sadeghi et al. (2020)[18] y Calautit et al. (2020)[4] analizaron la integración en escenarios reales, identificando limitaciones en entornos urbanos densos.
- Etapa de sostenibilidad y eficiencia energética (2021-2022): investigaciones de Nasrollahi et al. (2022)[15], Alazazmeh et al. (2021)[12] y Santamouris et al. (2021)[25] vincularon las TV con la agenda global de eficiencia energética y descarbonización. El conjunto de investigaciones muestra una progresión desde la prueba de concepto, pasando por la optimización geométrica, hasta la integración urbana y energética, confirmando la vigencia y pertinencia de las TV como estrategia arquitectónica de mitigación climática.

Tabla 1.1 Tabla comparativa de investigaciones sobre TV (ordenada por método)

Autor(es) y año	País / Región	Objetivo principal	Método	Resultados clave	Aporte / innovación
Bahadori et al. (2008)	Irán	Comparar TV convencionales y con superficies húmedas	Experimental + Numérico	Superficie húmeda más eficiente con vientos bajos; columna húmeda en vientos altos	Determina límites de uso de TV convencionales
Bouchahm et al. (2011)	Argelia	Validar vivienda bioclimática con TV	Experimental + modelo matemático	Mejor rendimiento en días cálidos y secos; confort térmico alcanzado	Integración de piscina de agua y ventilación de muro
Moghaddam et al. (2011)	Irán	Aplicación en edificios públicos	Estudio de caso experimental	Ventilación nocturna efectiva y uso de aberturas altas	Optimización de ventilación natural en espacios públicos
Reyes et al. (2013, 2015)	México	Similaridad dinámica en TV	Experimental + CFD	Coincidencia entre modelos numéricos y resultados experimentales	Validación metodológica y escalado
Dehghani et al. (2015)	Irán	Diseños innovadores (cabezal giratorio, materiales)	Prototipo experimental	Orientación variable mejora caudal; iluminación natural	Innovación formal y funcional

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla **III**

Autor(es) y año	País / Región	Objetivo principal	Método	Resultados clave	Aporte / innovación
Afshin et al. (2016)	Yazd, Irán	Impacto del ángulo de viento	Túnel de viento	Máxima ventilación a incidencia 0°	Optimización aerodinámica
Nejat et al. (2016)	Irán	Mejorar caudal con extensiones laterales	Experimental + CFD	Incremento del 50 % en ventilación	Validación de geometrías alternativas
Sadeghi et al. (2020)	Australia	Evaluar entorno urbano en TV	Túnel de viento (CPP Sídney)	Edificios cercanos reducen 25 % eficiencia	Consideración realista del contexto urbano
Li et al. (2023)	Reino Unido	Desarrollar TV con lamas ajustables para ventilación multidireccional	Experimental + CFD	Mayor captación de aire y menor pérdida de presión	Diseño adaptable con lamas móviles
Kalantar et al. (2009)	Irán	Evaluar enfriamiento evaporativo	Experimental + CFD (ANSYS Fluent)	Reducción de 10–15 °C aun sin viento	Potencial en climas cálidos y secos
Morales (2014)	México	Evaluar confort térmico con CFD	CFD (Fluent)	Mejor desempeño con chaflán 39°	Relación entre geometría y confort térmico
Calautit et al. (2020)	EAU	Integrar tubos de calor y superficies extendidas	CFD + túnel de viento	Mantiene flujo pero genera discomfort por humedad	Sistemas híbridos pasivos con limitaciones
Varela y Mo-ya (2020)	México	Extensiones de entrada (28 diseños)	CFD	Mejora de 3,9–7 % en flujo; algunos diseños negativos	Optimización aerodinámica
Varela et al. (2020)	México	Diseño de embudos de entrada	CFD	Incremento del 7,5 % en caudal	Geometrías embudo como solución eficiente
Carreto et al. (2021)	México	Evaluar 54 configuraciones TV-habitación	CFD + análisis lagrangiano	Configuración óptima con chaflán	Validación exhaustiva
Varela et al. (2021)	México	Variaciones en aberturas de salida (33 modelos)	CFD	Flujo estable con aberturas reducidas	Nuevas configuraciones de salida

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla **III**

Autor(es) y año	País / Región	Objetivo principal	Método	Resultados clave	Aporte / innovación
Sotelo et al. (2023)	México	Desempeño de 3 diseños de extensiones de entrada	CFD	Flujo estable con aberturas	configuraciones de entrada
Hernandez (2021)	México	TV en vivienda social con humidificación	CFD + caso real	Reducción de consumo de aire acondicionado	Aplicación social y económica
Flores Salas (2021)	México	TV en edificio académico (UAEM)	CFD + monitoreo real	Mejor ventilación en zonas de estudiantes	Aplicación académica real
Nejat et al. (2021)	Irán	Incorporar alas superiores para sombreado y ventilación	CFD + túnel de viento	Alas de 50 cm mejoran caudal y confort	Innovación arquitectónica
Liu et al. (2022)	Reino Unido	Integrar recuperación de calor en TV	CFD	Aumento de 6,4 °C en aire de suministro	Recuperación de calor mediante tubos sólidos
Zhang et al. (2022)	China	Ángulos del viento en edificios T y +	CFD	Reducción de zonas de baja velocidad con viento oblicuo	Influencia de forma urbana
Nasrollahi et al. (2022)	Taiwán	Confort en sala de conferencias	CFD + simulaciones reales	Mejor confort con aire a 15°C y 1 m/s	Aplicación en espacios cerrados
Calautit et al. (2024)	Reino Unido	Modelo rotatorio de doble canal para ventilación multidireccional	CFD paramétrico	Mayor estabilidad y caudal con vientos variables	Innovación geométrica rotatoria
Liu et al. (2024)	Reino Unido	Evaluar rendimiento térmico en climas fríos	CFD + análisis térmico	Reducción de pérdidas de calor	Extiende aplicación a climas fríos
Zhang et al. (2013)	China	Ventilación natural combinada (flotación y viento)	Revisión + análisis paramétrico	Ventajas de sistemas híbridos pero flujo inestable	Replantea integración de sistemas
Santamouris et al. (2021)	Internacional	Descarbonización del sector construcción	Revisión crítica	Relevancia del enfriamiento pasivo	Marco global y sostenible

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 1.1

Autor(es) y año	País / Región	Objetivo principal	Método	Resultados clave	Aporte / innovación
Sirror, H. (2024)	Internacional	Avances recientes en diseño de TV	Revisión bibliográfica	Tendencia a sistemas híbridos y adaptativos	Equilibrio entre tradición y tecnología
Alazazmeh et al. (2021)	Medio Oriente	Rehabilitación de edificio administrativo	Caso real	Reducción del 39 % en consumo energético	Aplicación de eficiencia energética

En los últimos años, la investigación sobre TV evolucionó de forma notable, orientándose hacia el desarrollo de sistemas más eficientes, adaptables y sostenibles. Diversos estudios recientes [38], [35], [36], [39] muestran que la TV ha dejado de considerarse únicamente una estrategia pasiva para climas cálidos, convirtiéndose en un componente versátil capaz de integrarse en distintos contextos climáticos y tecnológicos. Li et al. (2023)[35] proponen un innovador diseño con lamas ajustables (flap fin louver) que permite la captación de aire en múltiples direcciones, combinando experimentación y modelación CFD para optimizar el caudal y reducir las pérdidas de presión. Por su parte, Liu et al. (2024)[36] analizan el desempeño de las TV en condiciones invernales, destacando que la ventilación natural puede mantenerse efectiva si se complementa con estrategias pasivas que eviten pérdidas térmicas, lo que amplía su aplicabilidad en climas fríos. En la misma línea de innovación geométrica, otro estudio reciente Calautit et al. (2024)[37] desarrolla un modelo rotatorio de doble canal (rotary scoop dual-channel windcatcher), cuya optimización paramétrica demuestra una mejor respuesta ante vientos de dirección variable. A su vez, Liu et al. (2022)[38] exploran la incorporación de un sistema de recuperación de calor mediante bancos de tubos sólidos, evidenciando un aumento de hasta 6.4 °C en la temperatura del aire de suministro, lo que confirma el potencial de las configuraciones híbridas pasivas activas. Finalmente, Sirror (2024)[39] presenta una revisión integral que sintetiza los avances más relevantes y plantea la necesidad de equilibrar tradición, sostenibilidad y tecnología en el diseño contemporáneo de TV. En conjunto, estas investigaciones reflejan una tendencia clara hacia la modernización de las TV, enfocada en la optimización geométrica, la integración de tecnologías complementarias y la mejora del confort térmico con un bajo consumo energético, consolidándolas como una solución bioclimática vigente y eficiente para la arquitectura sostenible del siglo XXI.

1.3.6. Conclusiones del estado del arte

El análisis de la literatura nos constituye la base para establecer la metodología. Cada uno de los artículos expone los elementos más significativos de los estudios revisados, ver Tabla 1.1,

aportando de manera sustancial al cuerpo de conocimientos que respalda esta investigación.

- Los trabajos publicados muestran una tendencia a realizar experimentación mediante modelos a escala reducida en túneles de viento.
- La mayoría de las TV con forma rectangular son unidireccionales con una dirección de viento perpendicular a la ventana de captación.
- Se confirma de manera numérica y experimental que el uso de las TV mejora las condiciones de ventilación natural y de confort térmico dentro de las edificaciones.
- La configuración urbana que rodea a una casa con TV afecta su eficiencia en cierto porcentaje, sin embargo, a pesar de esto las TV siguen generando confort térmico adecuado.
- La humidificación del aire a la entrada de la TV permite una disminución de su temperatura de hasta 15°C en condiciones secas y calientes.
- Un chafflán de 39° en la entrada de las TV incrementa de manera sustancial la cantidad de aire inducido y la velocidad del mismo al pasar por el canal de captación.
- La aplicación de extensiones de entrada en las TV incrementa el flujo de aire captado e inducido hasta en un 7 % en relación a una configuración convencional.
- Los principales parámetros de ventilación natural son la dirección, la velocidad y la intensidad de los vientos.
- Las condiciones de frontera para los estudios dinámicos se consideran básicamente de dos tipos: entradas de velocidad y salidas de presión.

Estos puntos evidencian que las TV no solo son viables como sistemas de enfriamiento pasivo, también su desempeño puede ser optimizado mediante ajustes geométricos y un diseño contextualizado al entorno urbano. Su integración en edificaciones contemporáneas propicia beneficios tangibles en confort térmico y ahorro energético, lo que las convierte en un recurso relevante dentro de las estrategias de arquitectura bioclimática y sostenibilidad.

1.4. Objetivos y alcances

Los objetivos se establecen en función de las conclusiones del estudio del estado del arte.

1.4.1. Objetivo general

Proponer y evaluar numéricamente un diseño de TV que mejore las condiciones de ventilación natural y confort térmico en una casa de Temixco, Morelos, México, para condiciones de verano.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar la ubicación de la TV en una habitación térmicamente crítica
- Evaluar los parámetros de ventilación natural y confort térmico para la habitación sin/con TV, aplicando la norma ASHRAE Standard.

1.4.3. Alcances

Se contempla proponer un diseño de TV que cumpla con las características necesarias para mejorar las condiciones de confort térmico en una habitación de la casa de estudio, con base en estudios de CFD. Los estudios se realizan con el software comercial ANSYS Fluent aplicando el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ realizable; estado permanente, fluido newtoniano e incompresible y propiedades constantes. Se procesan los datos de la estación meteorológica más cercana a la ubicación de la casa, determinando la dirección predominante de los vientos y la velocidad promedio mensual horaria, así como los valores promedio de temperatura y humedad relativa. Para el estudio de la condición actual de ventilación de la habitación las condiciones de frontera se establecen experimentalmente, mientras que para el estudio comparativo sin/con TV se establecen conforme a la norma NOM-020-ENER-2011.

1.5. Metodología general

La metodología se engloba básicamente en tres etapas 1) numérica sin/con TV, 2) experimental, y 3) complementaria.

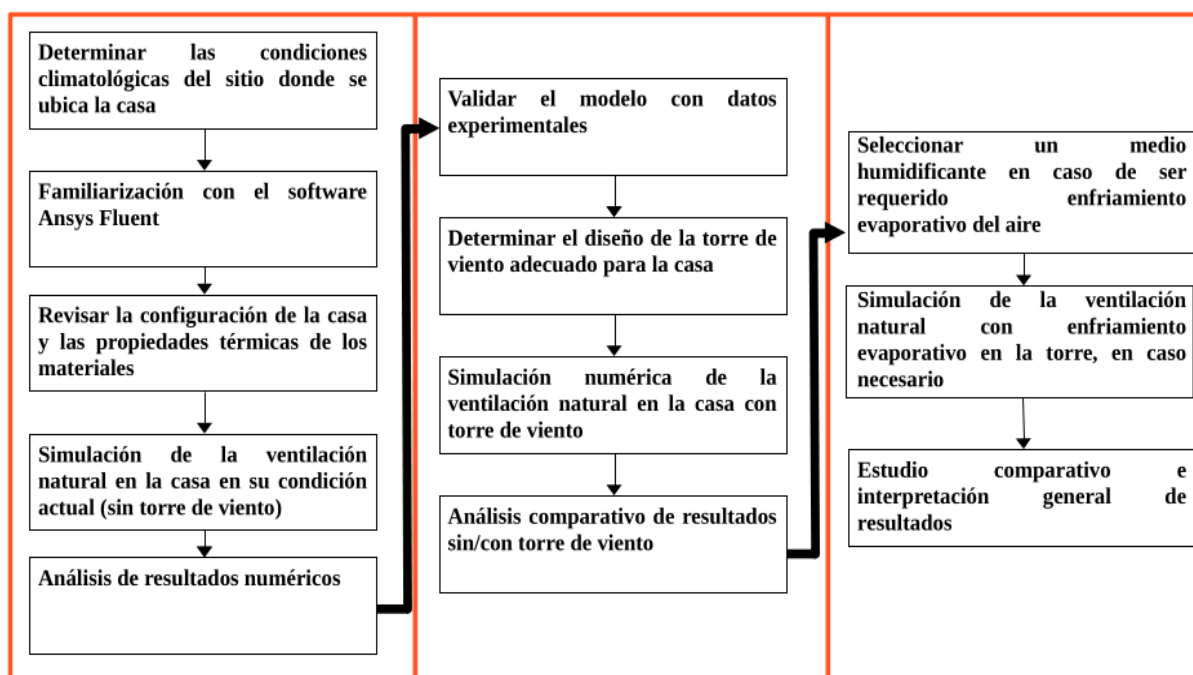


Figura 1.9 Metodología general

1.6. Contenido de la tesis

- Capítulo 1: Se presenta una conceptualización básica de las TV aplicadas en diversas regiones del mundo. Se discute el estado del arte y las aplicaciones relacionadas con el acondicionamiento climático y el confort térmico en zonas críticas. Además, se establecen los objetivos, alcances y limitaciones del estudio, así como la metodología.
- Capítulo 2: Se presentan las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fenómeno físico correspondiente al movimiento de los fluidos y las consideraciones establecidas para el desarrollo de las simulaciones numéricas posteriores. Los principios básicos del funcionamiento del software ANSYS Fluent.
- Capítulo 3: Se presenta el desarrollo experimental, basado en el monitoreo de las variables de interés en la habitación de estudio, que forma parte de una propiedad ubicada en el municipio de Temixco, Morelos, México. Este desarrollo sigue el protocolo experimental aplicado, que incluye una instalación realizada en dos etapas. La primera etapa consistió en estudios experimentales preliminares realizados en CENIDET, y la segunda en pruebas de campo aplicadas en la propiedad de estudio.
- Capítulo 4: Se desarrollan simulaciones numéricas basadas en los resultados obtenidos durante el proceso experimental realizado en la habitación de estudio. Este proceso incluye la representación del modelo físico sin TV, la discretización del volumen de control, el desarrollo del modelo matemático y la ejecución de la simulación numérica para validar el modelo numérico. Se analiza la condición actual de la habitación en términos de ventilación y confort térmico.
- Capítulo 5: Se realiza el estudio dinámico-térmico mediante la aplicación de modelos físicos con y sin TV, aplicando condiciones de frontera dinámicas establecidas mediante el análisis de datos meteorológicos obtenidos de la ESM-IER-UNAM, y condiciones de frontera térmicas conforme a la norma NOM-020-ENER-2011. Se analizan las condiciones de la habitación con y sin TV en términos de ventilación y confort térmico.
- Capítulo 6: Se exponen las conclusiones derivadas de los estudios realizados, junto con las sugerencias para optimizar y ampliar la investigación.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Caso de estudio

El lugar de estudio se ubica en la zona caliente de Temixco, Morelos. Cuenta con dos niveles y un subnivel de sótano.

2.1.1. Descripción de la casa y área de estudio

La atención se centra en la planta alta de la propiedad, que cuenta con cuatro recámaras. En la planta baja se encuentran la cocina, el comedor, la sala y la estancia, que son áreas importantes de la propiedad; sin embargo, en esta zona no se han identificado problemas relacionados con el confort térmico, por lo que se descarta su estudio. La atención se dirige principalmente a la planta alta, en particular a la habitación ubicada en el lado sur de la casa; en esta los ocupantes reportan que experimentan mucho calor durante la temporada de verano.

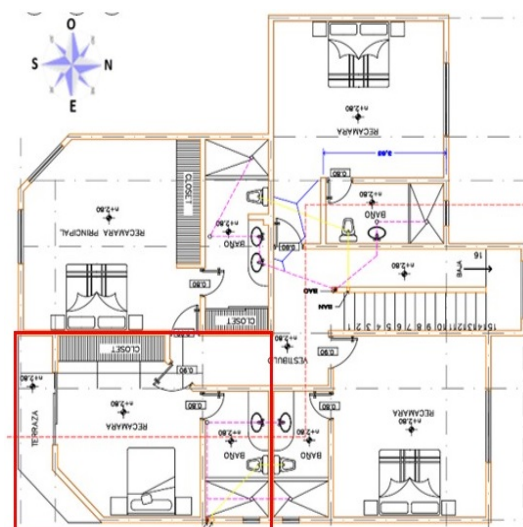


Figura 2.1 Planta alta de la propiedad

Debido a esto, solicitaron un estudio para la incorporación de un sistema pasivo de climatización como la TV. El análisis de las condiciones actuales de ventilación natural, bajo las circunstancias

más favorables, permitirá confirmar que, incluso en tales condiciones, no se logra el confort térmico adecuado. Esto refuerza la necesidad de incorporar TV en estas habitaciones.

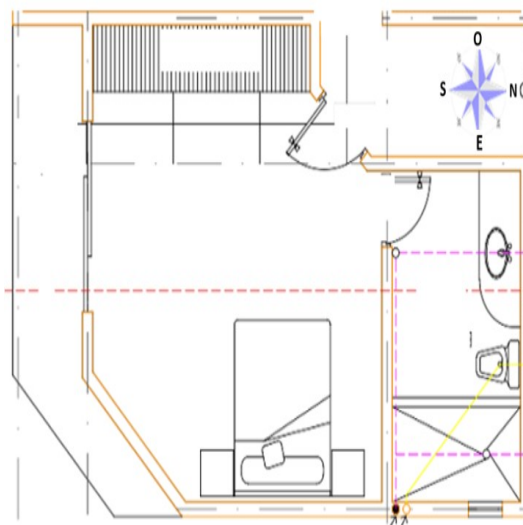


Figura 2.2 Plano de la habitación

2.1.2. Análisis de datos meteorológicos

La estación geográficamente más cercana al sitio de estudio es administrada por el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual proporcionó los datos en crudo que se analizaron por estaciones del año y, posteriormente por meses y días, con el fin de identificar aquellos con condiciones críticas y así establecer las condiciones de frontera necesarias para desarrollar los estudios numéricos sobre el estado actual de la ventilación natural, ver Fig. 2.3. La estación se ubica en el municipio de Temixco, Morelos, a una latitud de $18^{\circ}50'25,62''N$, longitud de $99^{\circ}14'10,49''O$ y a una altitud de 1253 m sobre el nivel del mar, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).



Figura 2.3 Estación Solarimétrica y meteorológica ESOLMET-IER-UNAM

La estación registra diversas variables, pero las de mayor interés para este estudio son: temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. El análisis se inicia con los datos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento correspondientes al periodo 2018-2020 durante la estación de verano. Esta estación se seleccionó porque los ocupantes de la vivienda señalaron que es la época del año en la que perciben más calor en la habitación de estudio.

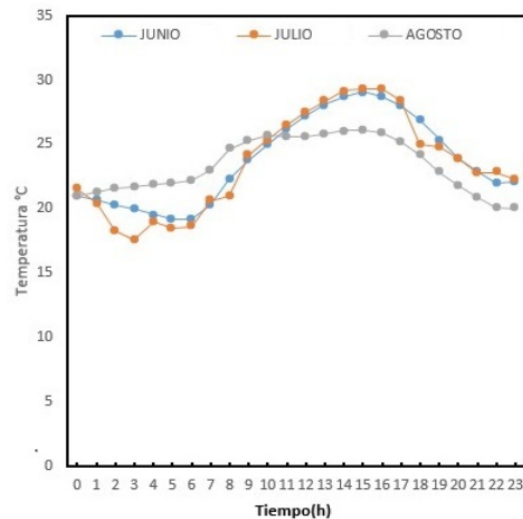


Figura 2.4 Comportamiento de la temperatura ambiente en la ESOLMET-IER-UNAM de Verano 2018-2020

No obstante, se evaluaron las cuatro estaciones del año entre 2018 y 2020, confirmando que el verano presenta los valores más altos de temperatura, según el análisis de los datos meteorológicos.

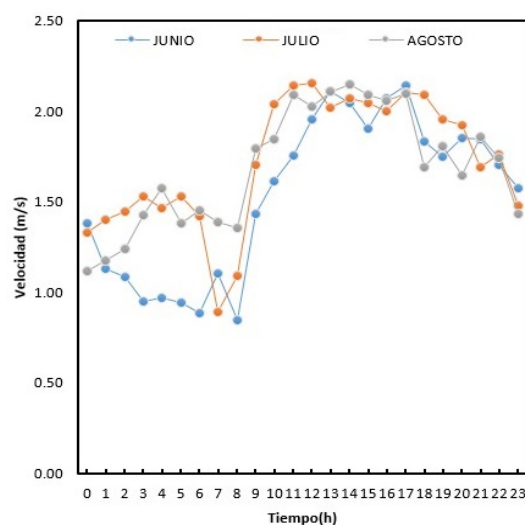


Figura 2.5 Comportamiento de la velocidad de viento en la ESOLMET-IER-UNAM de Verano 2018-2020

El estudio de la velocidad y dirección del viento se basa en la estación crítica, que corresponde al verano, siendo julio el mes más cálido, ver Fig. 2.4. Por ello, es necesario determinar la dirección predominante del viento, ver Fig. 2.6, y su intensidad, ver Fig. 2.5, analizando los datos registrados durante la estación de verano del periodo 2018-2020.

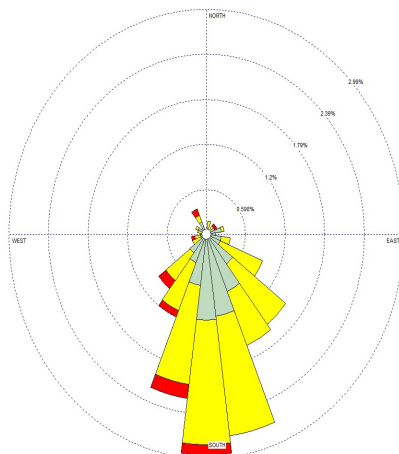


Figura 2.6 Dirección predominante promedio del viento en la ESOLMET-IER-UNAM de Verano 2018-2020

La dirección predominante del viento proviene del sur con una velocidad máxima promedio de 2.1 m/s durante el mes de julio, ver Tabla 2.1. Este valor se adoptó como la velocidad de entrada en la ventana de la TV (Inlet2) y permitió avanzar al siguiente paso del análisis, que consiste en determinar la velocidad del viento que ingresa por la ventana Inlet1, ver Fig. 2.10. Para este cálculo se utiliza la ley de potencia empírica, considerando que la ciudad se encuentra en un terreno ligeramente montañoso y asignando a α un valor de 0.13 [6].

Tabla 2.1 Promedios de datos meteorológicos en verano (2018-2020)

Mes	Variable	Mín	Máx
Junio	Temperatura (°C)	19.18	29.05
	Humedad (%)	42.22	86.31
	Velocidad (m/s)	0.85	2.14
Julio	Temperatura (°C)	17.57	29.30
	Humedad (%)	35.73	73.51
	Velocidad (m/s)	0.89	2.1
Agosto	Temperatura (°C)	20.02	26.14
	Humedad (%)	58.13	84.47
	Velocidad (m/s)	1.12	2.15

Dentro del ámbito de la ingeniería y la mecánica de fluidos, esta relación es conocida como la ley de potencia que describe la variación vertical de la velocidad del viento, comúnmente denominada power law wind profile.[42] Aplicando la siguiente ecuación:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

- α : Coeficiente para terrenos accidentados.
- h_1 : Altura promedio de la estación meteorológica.
- h_2 : Altura a la mitad de la ventana.
- v_1 : Velocidad de referencia de la estación meteorológica.

Según los valores obtenidos del análisis de datos, la velocidad del viento que ingresa por la ventana de la habitación (Inlet1) es de 1.89 m/s (ver Fig. 2.10).

2.1.3. Modelos geométricos en CAD

Con el propósito de familiarizarse con el software ANSYS Fluent, se llevó a cabo el análisis de los planos de la propiedad. A partir de esta información, se realizó el levantamiento completo, ver Fig. 2.7, utilizando la herramienta SpaceClaim, la cual permite generar modelos CAD en tres dimensiones de alta definición. Se emplearon herramientas de extrusión, corte, medición, espejo, entre otras, desarrollando habilidades de operación del software.

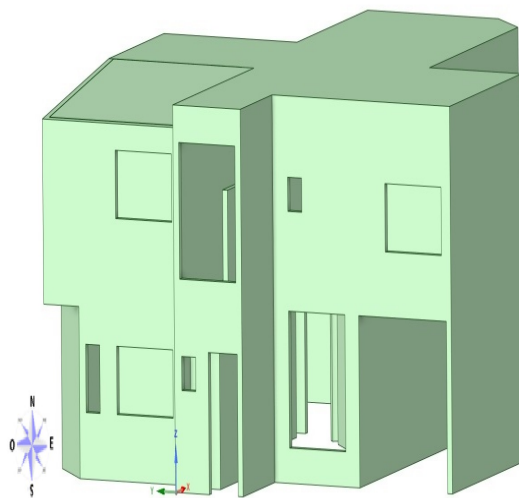


Figura 2.7 Modelo CAD fachada principal

La habitación se encuentra en el segundo nivel de la propiedad; por ello, el modelo CAD fue seccionado para centrar el análisis en este piso, ver Fig. 2.8, que es donde se presentan los principales problemas de confort térmico. Los residentes señalaron que la habitación ubicada en la porción sur de la construcción es la que presenta un exceso de calor durante el verano. A partir de esta observación, se planteó la hipótesis de que en esa área no se alcanza el confort térmico, por lo que el modelo CAD fue seccionado hasta representar únicamente la habitación principal que es objeto de estudio, ver Fig. 2.9.

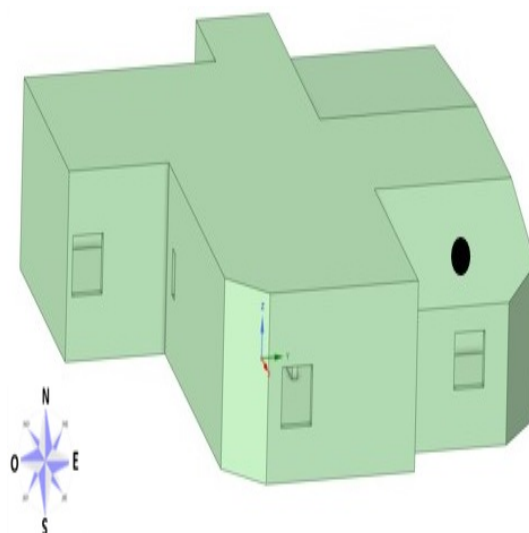


Figura 2.8 Modelo CAD del segundo nivel de la casa de estudio fachada trasera

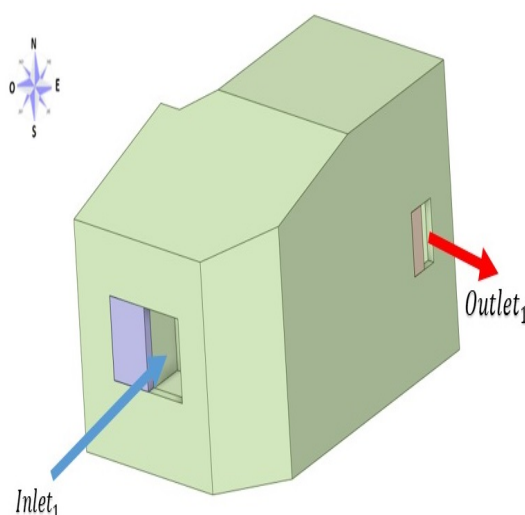


Figura 2.9 Modelo CAD de la habitación de estudio

El diseño de la TV en este estudio se fundamentó en las condiciones climáticas locales y en la evidencia reportada en la literatura científica, priorizando su adecuación al caso de estudio descrito en la sección 2.1.1. El estado del arte identifica que el desempeño de una TV depende principalmente del número de ventanas de captación, su orientación respecto a los vientos dominantes y su integración con el espacio interior. En particular, diversos estudios señalan que, cuando existe una dirección predominante del viento, el uso de una TV con dos ventanas resulta adecuado para favorecer la captación del flujo de aire y mejorar su distribución en los espacios interiores[19, 16]. La orientación de la TV se definió a partir del análisis de los vientos predominantes de la zona de estudio, presentado en la sección 2.1.2, ya que este parámetro ha sido identificado como uno de los factores más influyentes en el desempeño de este tipo de sistemas. Con base en los datos meteorológicos obtenidos de la estación ESM-IER-UNAM, se determinó que la dirección predominante del viento proviene del sur, ver Fig. 2.6; por lo tanto, la TV fue orientada hacia dicha dirección. La ubicación de la TV dentro de la vivienda se

estableció considerando las zonas de la habitación donde los ocupantes permanecen la mayor parte del tiempo, las cuales se identificaron como áreas críticas en términos de ventilación y confort térmico, así como las restricciones estructurales del inmueble. Como resultado, la TV se colocó en la esquina superior este de la habitación, donde la presencia de un muro de carga permitió su integración al modelo CAD del inmueble sin comprometer la estabilidad estructural. La altura de la TV se determinó utilizando como referencia la altura de la estación meteorológica ESM-IER-UNAM, debido a su cercanía con la zona de estudio, y considerando la distancia entre el nivel del suelo y el centro de la abertura de entrada de viento (inlet 1), como se describe en la sección 2.1.2. Mediante la aplicación de la ecuación correspondiente al perfil de velocidad del viento en terrenos accidentados (ecuación 2.1), se obtuvo una altura final de la TV de 2.3 m con respecto al nivel del techo, garantizando condiciones representativas del viento incidente. Finalmente, se adoptó un diseño de TV de dos ventanas, acorde con la existencia de una dirección predominante del viento. El diseño, ver Fig. 2.1, incluye una ventana de captación y una ventana de salida de dimensiones iguales (0.84 m x 0.6 m), así como una curva de inducción de 39° en la entrada. De acuerdo con lo reportado en la literatura [19, 16], esta geometría favorece una mejor alineación del flujo incidente y contribuye a incrementar la cantidad de aire que ingresa al interior de la habitación, mejorando el desempeño de la ventilación natural.

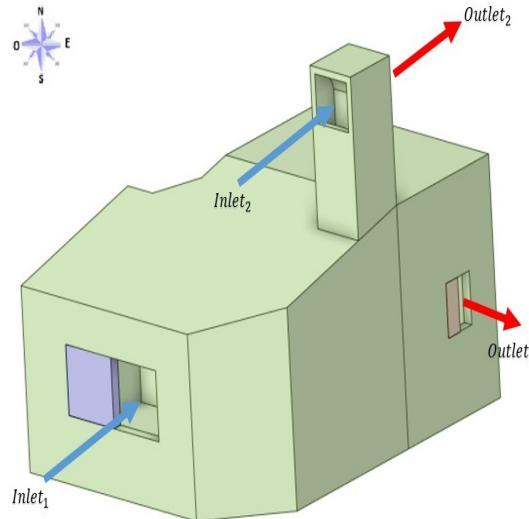


Figura 2.10 Modelo CAD de la habitación con TV

2.2. Modelos matemáticos

El comportamiento de los fluidos se analiza físicamente y se representa matemáticamente mediante ecuaciones, a las cuales se les aplican simplificaciones para reducir la complejidad del fenómeno.

2.2.1. Ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos

Se considera un flujo incompresible y una disipación viscosa despreciable así como fluido en estado permanente.

- Fluido newtoniano: se dice que un fluido es newtoniano si su viscosidad, que es la medida o capacidad de un fluido para resistir el flujo, solo varía como una respuesta a los cambios de temperatura o presión. Un fluido newtoniano tomará la forma que tenga su contenedor. En condiciones de temperatura y presión constantes, la viscosidad de un fluido newtoniano es la constante de proporcionalidad en la relación lineal entre el esfuerzo cortante que se forma en el fluido para resistir el flujo y la velocidad de corte aplicada al fluido para inducir el mismo; la viscosidad es la misma para todas las velocidades de cizallamiento aplicadas al fluido. El agua, las soluciones de azúcar, la glicerina, los aceites de silicona, los hidrocarburos livianos, además, el aire y otros gases son todos ejemplos de fluidos newtonianos.
- Fluido incompresible: en el régimen de flujo incompresible se supone que la densidad del fluido es constante, independiente de las coordenadas espaciales y del tiempo, simplificándose así extraordinariamente el análisis del movimiento.
- Disipación viscosa despreciable: la disipación viscosa es despreciable en la ecuación de energía. Este término relaciona el aumento de la energía interna del fluido debido al movimiento viscoso de este y es relevante solo para fluidos muy viscosos moviéndose a muy altas velocidades cuando los gradientes de velocidad son muy elevados.
- Estado permanente: cuando la velocidad en un punto cualquiera permanece constante al transcurrir el tiempo, la velocidad de las partículas fluidas al pasar por un punto dado es siempre la misma. La condición de régimen estacionario significa que la velocidad de las partículas fluidas es tan sólo función de sus coordenadas espaciales y no del tiempo.
- Modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ realizable: el software ANSYS Fluent utiliza el método de volumen finito para resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo de fluido. Estas ecuaciones son la ecuación de conservación de masa, la de cantidad de movimiento y la de energía, correspondientes a la formulación RANS (Reynolds Averaged Navier–Stokes, por sus siglas en inglés), para flujo turbulento tridimensional, en estado permanente y bajo la ley de Boussinesq para la viscosidad.

Aplicando las consideraciones presentadas en este apartado, las ecuaciones de conservación gobernantes quedan de la siguiente manera:

Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.2)$$

Ecuación de momentum

$$\nabla \cdot (\rho \overline{u_i \vec{V}}) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x} + \nabla \cdot [\mu \nabla \overline{u_i} + \rho \overline{u'_i u'_j}] \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \overline{u_j \vec{V}}) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial y} + \nabla \cdot [\mu \nabla \overline{u_j} + \rho \overline{u'_i u'_j}] - \rho g \beta (\overline{T} - \overline{T}_0) \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \overline{u_k \vec{V}}) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial z} + \nabla \cdot [\mu \nabla \overline{u_k} + \rho \overline{u'_i u'_j}] \quad (2.5)$$

Ecuación de energía

$$\nabla \cdot (\rho C_p \overline{T \vec{V}}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \overline{T}) + \rho \overline{u'_i T'} \quad (2.6)$$

$\vec{V}$ es el vector velocidad cuyas componentes son (u_u, u_v, u_w) , ρ es la densidad, P es la presión, mientras $g, \mu, \beta, C_p, \lambda, \nabla \overline{T}$ y T_0 son la gravedad, viscosidad molecular, coeficiente de expansión térmica volumétrica del aire, calor específico, conductividad térmica, temperatura y temperatura de referencia respectivamente. El tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds incluido en las ecuaciones (2.3 y 2.5), $\rho \overline{u'_i u'_j}$, conduce a un problema de cierre. El tensor se define como:

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.7)$$

Donde la viscosidad turbulenta relaciona los esfuerzos turbulentos de Reynolds con gradientes de velocidad media. En contraste con la viscosidad molecular μ , μ_t no es una propiedad del fluido sino que depende fuertemente del estado local de la turbulencia y puede variar significativamente desde un punto a otro en el fluido. El modelo de turbulencia utilizado en este trabajo es el $k - \varepsilon$ realizable, aplicado ampliamente en el campo de la investigación sobre ventilación natural. Para este modelo:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

Donde la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de energía cinética turbulenta (ε) se determinan resolviendo las ecuaciones de transporte que se enuncian a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k \overline{u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_K + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon \overline{u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.10)$$

La definición de todas las variables involucradas pueden encontrarse en la Ref. [8]

2.2.2. Generalidades del Software ANSYS Fluent

ANSYS Fluent proporciona capacidades de modelado integrales para una amplia gama de problemas de flujo de fluidos incompresibles y compresibles, laminares y turbulentos. Se pueden realizar análisis de estado estacionario o transitorio; se combina una amplia gama de modelos matemáticos para fenómenos de transporte (como transferencia de calor y reacciones químicas) con la capacidad de modelar geometrías complejas. Los ejemplos de aplicaciones de ANSYS Fluent incluyen flujos laminares no newtonianos en equipos de proceso; transferencia de calor conjugada en turbomaquinaria y componentes de motores de automóviles; combustión de carbón pulverizado en calderas de servicios públicos; aerodinámica externa; flujo a través de compresores, bombas y ventiladores; y flujos multifásicos en columnas de burbujas y lechos fluidizados. Se pueden modelar varios modos de transferencia de calor, incluida la convección natural, forzada y mixta, con o sin transferencia de calor conjugada, medios porosos, etc. [8] Generalmente, para la solución de un problema, la secuencia y estructura para un usuario de CFD consta de tres partes fundamentales, en el siguiente orden:

Pre-proceso → Solver → Post-proceso

En este caso en particular nos concentramos en el uso de CFD con la herramienta de software ANSYS Fluent, la cual cuenta con un espacio de trabajo destinado llamado Workbench, ver Fig. 2.11, el cual nos permite seleccionar directamente el proceso que se debe realizar en un apartado completo que incluye Pre-proceso, Solver y Post-proceso. [31]

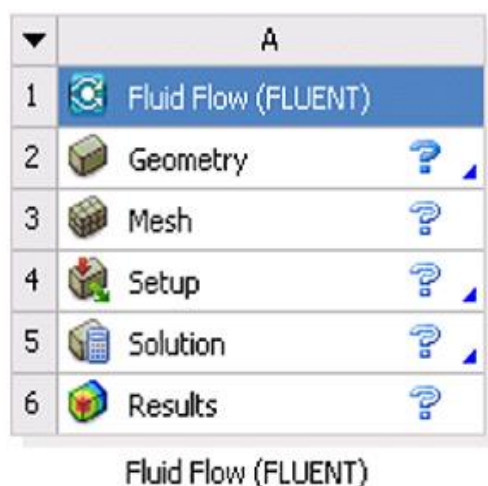


Figura 2.11 Estructura de trabajo de CFD [8]

En general, el proceso de realización de una simulación numérica en el software ANSYS Fluent es el siguiente:

1. Definir una geometría o dominio computacional.
2. Generar una malla numérica adecuada.

3. Especificar los fenómenos físicos que se pretenden modelar.
4. Especificar las propiedades físicas del medio.
5. Establecer las condiciones iniciales y de frontera.
6. Inicializar la simulación numérica.
7. Análisis de resultados.

2.3. Eficiencia de la ventilación

El desempeño de la ventilación suele medirse utilizando determinados parámetros, siendo relevantes los cambios de aire. [\[27\]](#)

2.3.1. Cambios de aire

La eficiencia en la renovación del aire se determina como la relación entre la edad del aire en una habitación con mezcla perfecta y la edad media del aire en la zona donde respiran los ocupantes. Este concepto también refleja la capacidad del sistema de ventilación para reemplazar el aire estancado con aire fresco y se define de la siguiente manera:

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{2\bar{\tau}_p} \quad (2.31)$$

Donde τ_n representa la constante de tiempo nominal y $\bar{\tau}_p$ corresponde al inverso de los recambios de aire por hora (ACH), el cual puede calcularse utilizando el volumen del recinto (V) y la tasa de suministro de aire (Q), según la siguiente expresión:

$$\tau_n = \frac{1}{ACH} = \frac{V}{Q} \quad (2.32)$$

2.4. Confort térmico

Los índices PMV y PPD reflejan la percepción térmica promedio de una persona en relación con el ambiente que la rodea.

2.4.1. Voto medio predicho (PMV)

El modelo del Voto Medio Predicho (PMV) se basa en principios de equilibrio térmico para establecer la relación entre los seis factores clave que determinan el confort térmico. Si el valor de PMV obtenido se encuentra dentro del rango recomendado, se considera que las condiciones están dentro de la zona de confort. La escala de percepción térmica de ASHRAE, diseñada para evaluar cómo las personas perciben la temperatura, se describe de la siguiente manera: [\[27\]](#)

Tabla 2.2 Escala de sensación térmica

+3	Muy caliente
+2	Caliente
+1	Ligeramente caliente
0	Neutral
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Muy frío

El PMV es una función de la tasa metabólica (M) y del balance entre las ganancias y pérdidas de energía (L) del cuerpo humano. Se define de la siguiente manera:

$$PMV = 0,303 \cdot [\exp(0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot L \quad (2.32)$$

Para calcular L que son las ganancias y pérdidas de energía se utiliza la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} L = & (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - P_a] - 0,42 [(M - W) - 58,15] \dots \\ & - 1,7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) - 0,0014 M (34 - t_a) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 \dots \\ & - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \quad (2.32)$$

M corresponde a la tasa metabólica expresada en W/m^2 , mientras que W indica el trabajo mecánico efectivo, también en W/m^2 . La variable P_a representa la presión parcial del vapor de agua en Pascales, y t_a es la temperatura del aire en $^{\circ}C$. El parámetro f_{cl} hace referencia al factor de área asociado a la vestimenta, t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa en $^{\circ}C$ y $\bar{t}_r$ denota la temperatura radiante media en $^{\circ}C$. Por último, h_c es el coeficiente de transferencia de calor expresado en W/m^2K . El valor numérico del PMV indica la distancia respecto al estado térmico neutro ($PMV = 0$), ver Tabla 2.2, y el intervalo -0.5 a 0.5 define el margen máximo de desviación aceptable de ese estado para que una persona promedio siga percibiendo confort térmico.

2.4.2. Porcentaje predicho de personas insatisfechas (PPD)

El índice PPD (porcentaje predicho de personas insatisfechas) está vinculado al PMV, como se muestra en la Fig. 2.14. Este índice parte del supuesto de que quienes califican su sensación térmica con valores de $+2$, $+3$, -2 o -3 se consideran insatisfechos, y asume, de manera simplificada, que el PPD es simétrico respecto a un valor neutro de PMV.[\[27\]](#) Se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad (2.32)$$

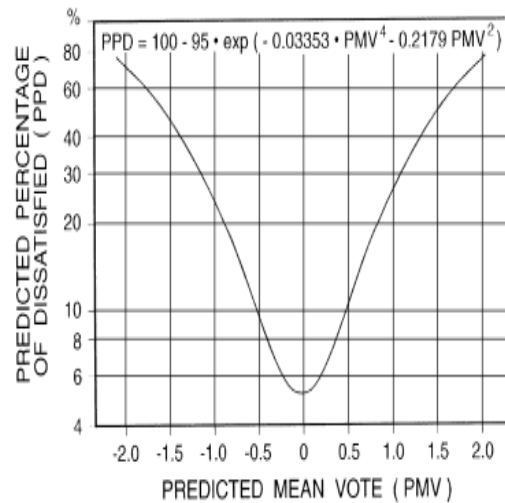


Figura 2.12 PPD en función del PMV [27]

El PMV describe cómo se percibe térmicamente un ambiente, mientras que el PPD indica qué porcentaje de personas probablemente se sentirá incómodo bajo esas mismas condiciones. Cuando el PMV se aproxima a cero, el PPD es bajo; a medida que el PMV se aleja del estado neutral, el PPD aumenta, ver Fig. 2.12.

Capítulo 3

Metodología experimental

3.1. Protocolo experimental

Se establece un protocolo para llevar a cabo la prueba preliminar del sistema de medición de temperatura y humedad relativa, con el objetivo de obtener las variables correspondientes. Su implementación permite definir el proceso a seguir para la generación de resultados.

3.1.1. Algoritmo

Se trata de un proceso general del desarrollo experimental, en el cual se describen de forma concisa, las actividades relevantes realizadas.

1. Planteamiento del problema a resolver, apoyado en diagramas de flujo.
2. Descripción de los instrumentos de medición y materiales.
3. Ejecución de pruebas experimentales preliminares en una habitación piloto.
4. Análisis de los resultados preliminares.
5. Aplicación del protocolo experimental en la habitación de estudio.
6. Análisis de los resultados experimentales.

3.1.2. Diagrama de flujo

Para desarrollar el algoritmo de adquisición de datos de los sensores, se utilizó un microcontrolador Arduino en conjunto con el adquisidor de datos PLX-DAQ, se diseñó un diagrama de flujo, ver Fig. 3.1, como base para la implementación del algoritmo de adquisición.

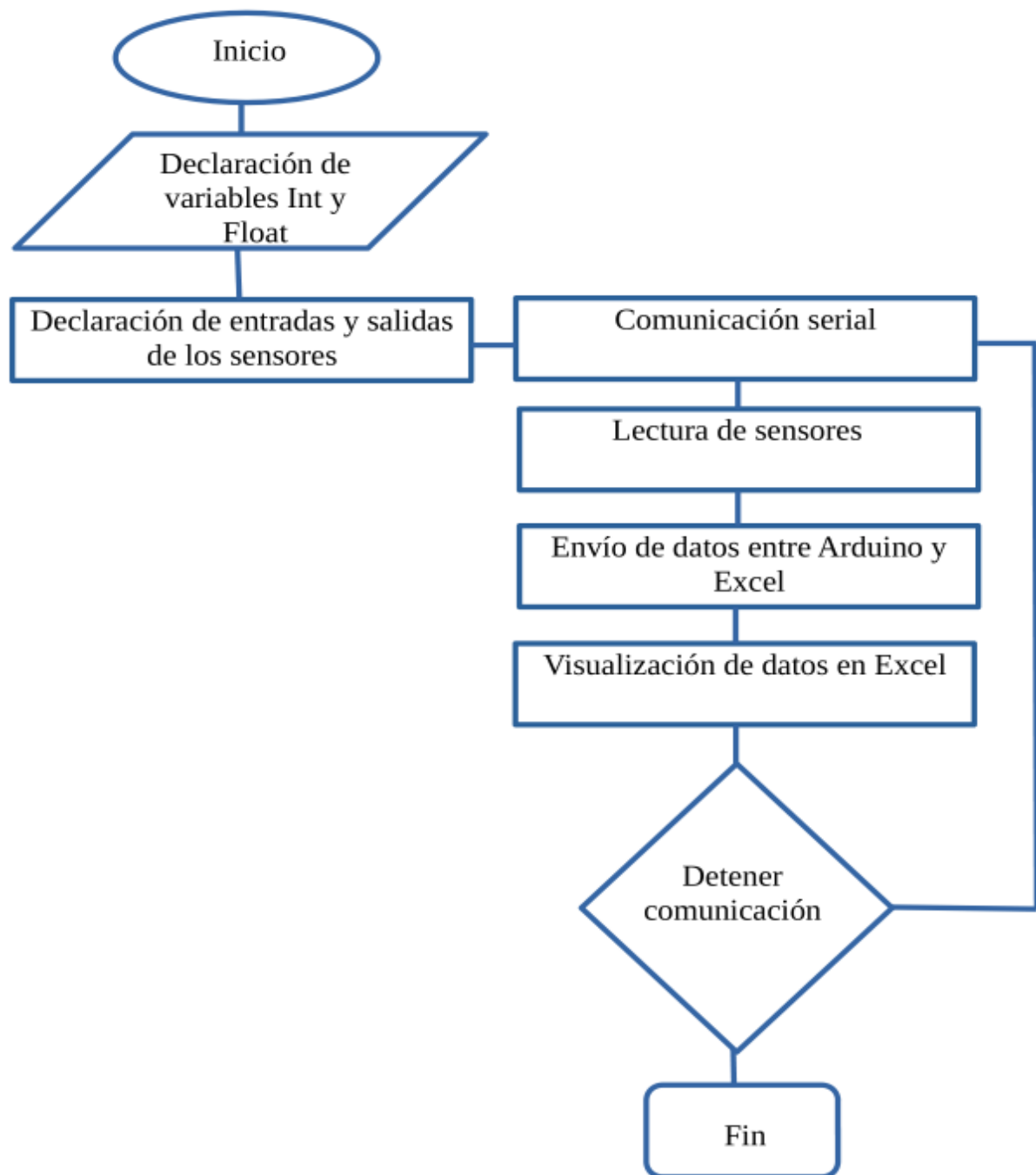


Figura 3.1 Diagrama de flujo del desarrollo experimental

3.1.3. Características de los instrumentos de medición y materiales

Para realizar la medición de la temperatura y la humedad relativa, se eligieron diversos instrumentos considerando su precisión y costo, con el objetivo de optimizar la relación costo-beneficio.

- Arduino UNO

Es una placa basada en el micro-controlador ATmega328P. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 pueden ser usando con PWM), 6 entradas analógicas,

un cristal de 16Mhz, conexión USB, conector de alimentación, terminales para conexión ICSP y un botón de reinicio. Tiene toda la electrónica necesaria para que el micro controlador opere, simplemente hay que conectarlo a la energía por el puerto USB o con un transformador AC-DC, ver Fig. 3.2.



Figura 3.2 Arduino UNO [41]

- Arduino NANO

Es una placa pequeña, completa y fácil de usar, basado en el ATmega328P. Tiene la misma funcionalidad del Arduino Uno, pero en un paquete diferente de entradas tanto analógicas como digitales. Su conexión se realiza mediante un cable USB Mini-B en lugar de uno estándar, ver Fig. 3.3.

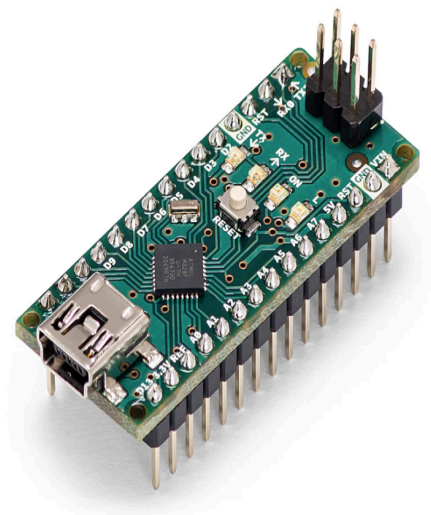


Figura 3.3 Arduino NANO [41]

- Sensor DS18B20

El sensor DS18B20 cuenta con un rango de temperatura de intervalo de -55°C a 125°C ,

tiene un intervalo de resolución que va desde los 9 hasta 12 bits (configurable), interfaz 1-Wire (que puede funcionar con un solo pin), identificador interno único de 64 bits, un beneficio significativo con el cual cuenta este sensor es que se pueden conectar múltiples sensores en el mismo pin, su precisión es de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$) y su tiempo de captura es inferior a 750ms, ver Fig. 3.4.



Figura 3.4 Sensor DS18B20 [41]

- Cable estañado 22 AWG 080-417

Se trata de un forro cilíndrico de PVC, que en su parte interna tiene entrelazados 4 pares de cables de cobre, cuyo calibre es 24 AWG, y se encuentran recubiertos por un material plástico de diversos colores, a fin de diferenciarlos entre sí y en algunos casos se puede encontrar un divisor, que en lenguaje técnico suele llamársele espina. El conjunto de todos estos materiales, son los que permiten la transmisión, ver Fig. 3.5.



Figura 3.5 Cable estañado 22 AWG 080-417 [41]

- Módulo sensor de temperatura y humedad

El sensor DHT22 tiene un voltaje de operación de 3V a 6V DC, un rango de medición de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su precisión de medición de temperatura es menor a $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con una resolución de temperatura de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. El rango de medición de humedad es de 0% a 100% HR y su precisión de medición de humedad es de 2% HR con una resolución de humedad de 0.1% HR, ver Fig. 3.6.



Figura 3.6 Módulo sensor de temperatura y humedad DHT22 [41]

3.2. Desarrollo experimental preliminar

Es la aplicación del desarrollo experimental en una habitación externa a la zona de estudio principal con el objetivo de identificar ciertas incertidumbres que puedan afectar el desarrollo del proyecto. Se ejecutan pruebas del funcionamiento de los equipos de cómputo, sensores y la tarjeta de adquisición de datos.

3.2.1. Descripción del experimento

Se llevó a cabo un trabajo experimental preliminar en un espacio de 27 m^3 , ver Fig. 3.7, donde se instalaron sensores de temperatura DS18B20 en los cuatro muros laterales y en el techo de la habitación. Se implementó el cableado correspondiente y se conectó al sistema de medición desarrollado en Arduino para verificar su operatividad. Para la instalación, se utilizó soldadura de estaño-plomo aplicada con un cautín convencional. Además, se colocó un sensor de temperatura y humedad en el centro de la habitación, también conectado al sistema.

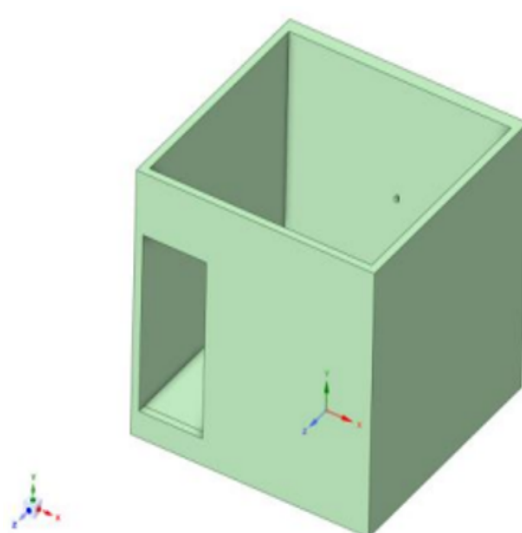


Figura 3.7 Modelo CAD de la habitación preliminar

3.2.2. Calibración de sensores

PLX-DAQ es un complemento para Microsoft Excel cuya principal característica es la capacidad de registrar hasta 26 canales de datos provenientes de microcontroladores, como la placa Arduino. A medida que los datos se capturan, el software los asigna automáticamente a columnas numeradas, generando una hoja de cálculo para el análisis de la información recolectada en campo, así como para el monitoreo en tiempo real del funcionamiento de los sensores y equipos.

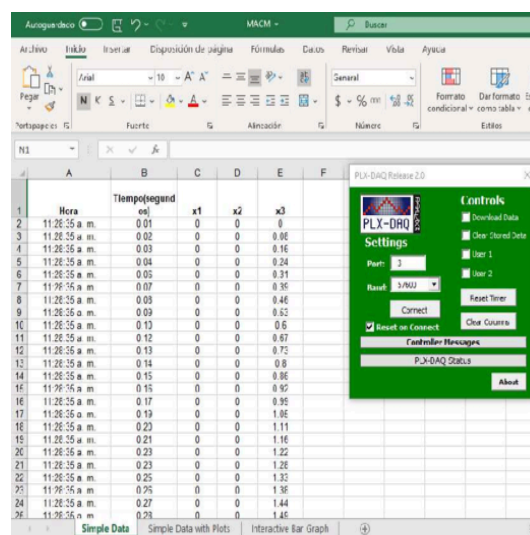


Figura 3.8 Pantalla principal de la herramienta PLX-DAQ

Efectuando una comparación de datos capturados utilizando los sensores LM35, ver Fig. 3.9, y sensores DS18B20, ver Fig. 3.10, para justificar el cambio de los sensores analógicos a sensores digitales.

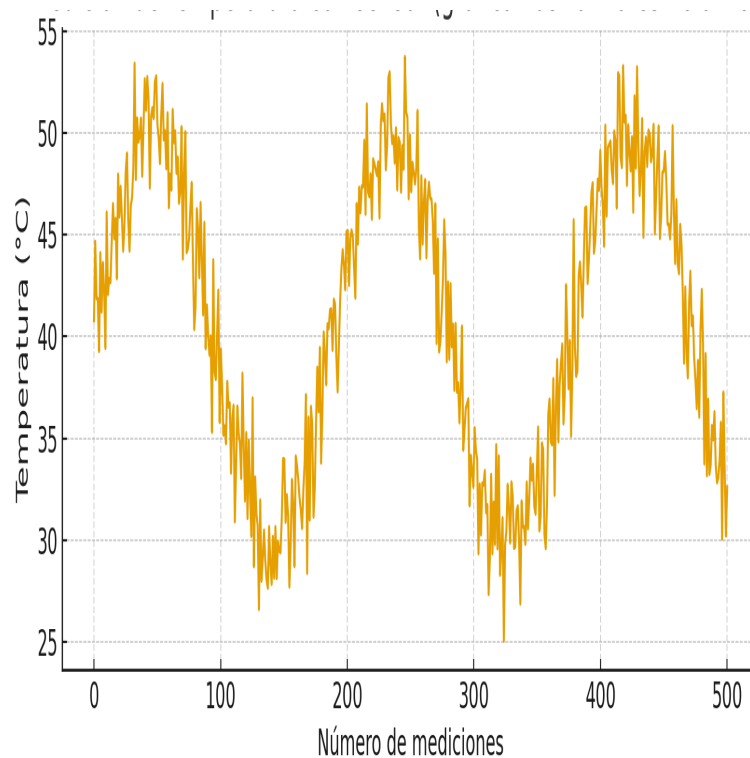


Figura 3.9 Mediciones con sensor LM35

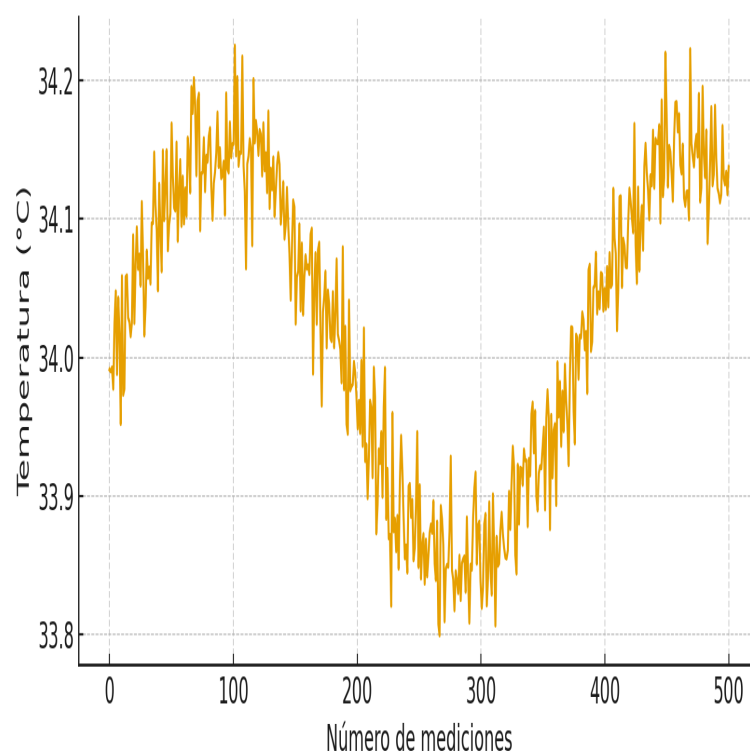


Figura 3.10 Mediciones con sensor DS18B20

La comparación evidencia una variación notable en los datos obtenidos con los sensores LM35, los cuales presentan menor precisión durante la medición, ver Fig. 3.9. Por su parte, los sensores DS18B20 ofrecen una mejora significativa en la exactitud de los datos. El promedio de las mediciones muestra una diferencia considerable, y la desviación estándar (DE) confirma que

la dispersión de los datos es mínima al utilizar los sensores DS18B20, lo que permite obtener mediciones más precisas y con un menor margen de error, ver Fig. 3.10.

3.2.3. Prueba del sistema adquisidor de datos

Los sensores se instalaron en cada uno de los muros correspondientes, incluyendo un sensor de humedad ubicado en el centro de la habitación destinada a las pruebas experimentales preliminares. Se describen las conexiones establecidas para la adquisición de datos, considerando que el uso de entradas digitales permite aumentar el número de sensores conectados, lo cual representa una ventaja significativa respecto a las entradas analógicas, ver Fig. 3.11, 3.12 y 3.13.

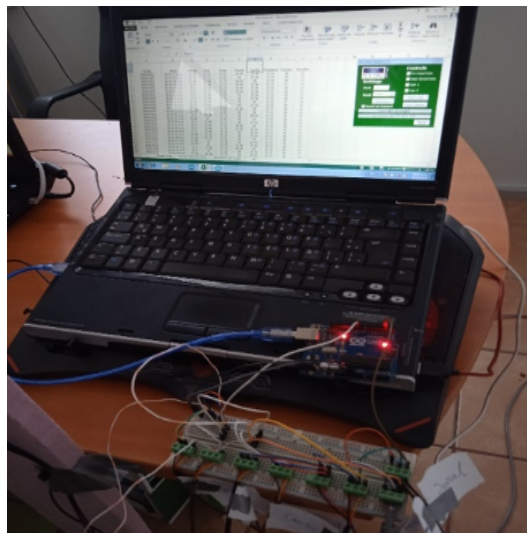


Figura 3.11 Equipo de cómputo

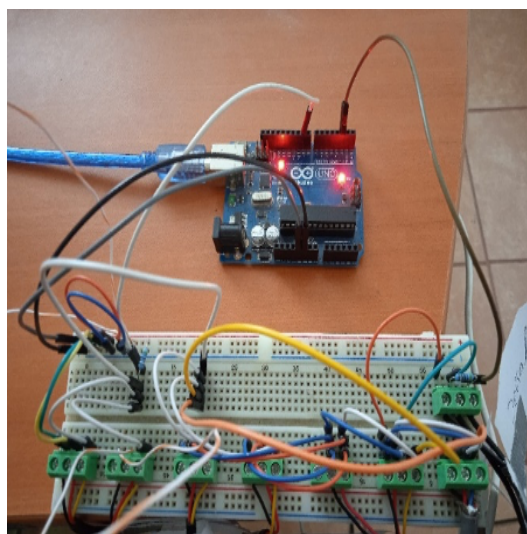


Figura 3.12 Conexiones con Arduino



Figura 3.13 Conexiones con los puntos de medición

A partir de la comparativa, se procedió a la captura de datos utilizando los sensores DS18B20. Los resultados de la medición permiten obtener la curva de temperatura a lo largo de un día. Este comportamiento de la variable es consistente con lo esperado, ya que la curva alcanza su valor máximo alrededor del mediodía y disminuye progresivamente hacia la noche, concluyendo en su punto mínimo, ver Fig. 3.14.

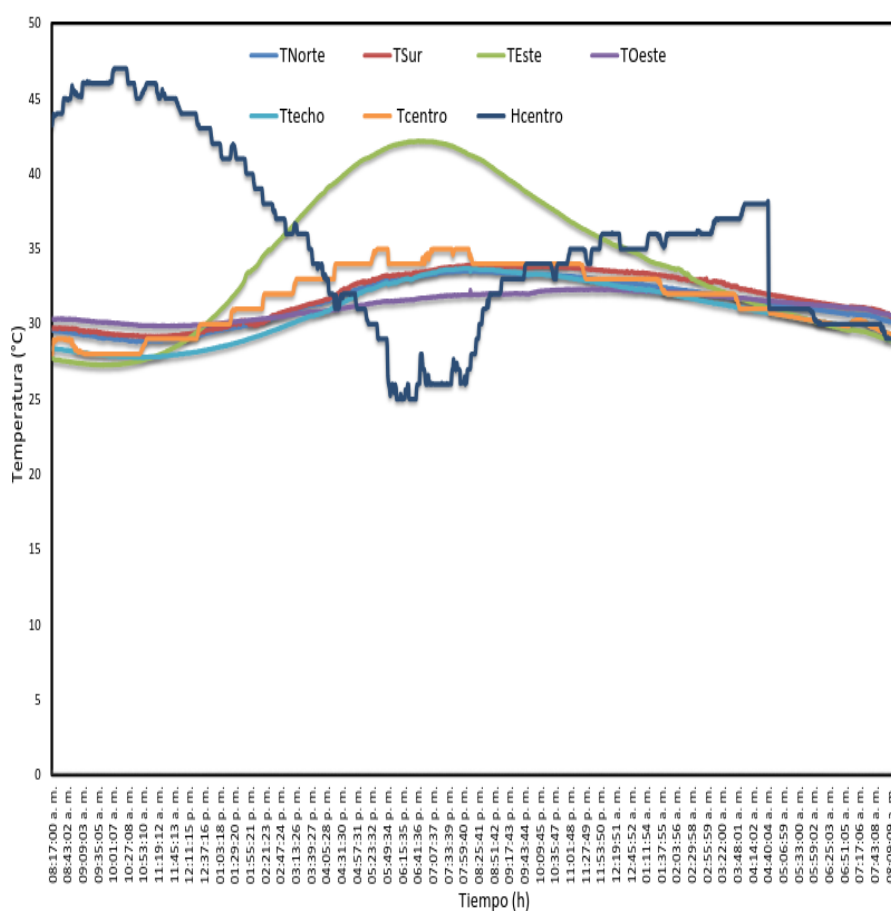


Figura 3.14 Medición de temperatura y humedad preliminar

La adquisición de datos permitió analizar la variación de la temperatura en cada muro (norte, sur, este y oeste), así como en el techo y en el centro de la habitación (ver Tabla 3.1). La humedad relativa mostró un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura, alcanzando sus valores máximos cuando la temperatura se encuentra en su punto mínimo, lo que confirma la estrecha relación entre ambas variables. Para la medición de la velocidad del viento, se utilizó una ventana orientada al sur, con dimensiones de 1 m x 1 m, ubicándose el sensor en el centro de la misma y verificándose su funcionamiento.

Tabla 3.1 Captura de datos de temperatura y humedad

	TNorte	TSur	TEste	TOeste	Ttecho	Tcentro	Hcentro
PROM	31.44	31.85	34.10	31.22	30.88	31.74	35.39
MAX	33.32	33.91	42.18	32.32	33.69	35.00	47.00
MIN	28.82	29.16	27.27	29.85	27.77	28.00	25.00
DE (desviación estandar)	1.54	1.65	4.88	0.82	1.95	2.13	6.01

Capítulo 4

Estudio experimental y numérico del flujo de aire en la habitación

4.1. Estudio experimental

La etapa experimental de este proyecto se basa en la implementación de un sistema de adquisición de datos, desarrollado sobre la plataforma Arduino, destinado a medir la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento dentro de la habitación de estudio.

4.1.1. Equipo, materiales e instrumentación

La habitación fue instrumentada para monitorear la temperatura en las paredes internas, la humedad relativa en el centro de la habitación y la velocidad del viento en la ventana de entrada. Los materiales e instrumentos utilizados en la experimentación, ver Tabla 4.1, así como sus características, fueron seleccionados con respecto a su precisión y costo.

Tabla 4.1 Resultados de medición de temperatura y humedad

Materiales e instrumentos	Características
Arduino Nano	Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 8 pines analógicos
Sensor de temperatura DS18B20	Su precisión es de $\pm 0.5^{\circ}C$ ($-10^{\circ}C$ a $+85^{\circ}C$)
Cable estañado AWG 080-417	Estañado sencillo
Sensor de temperatura y humedad DTH22	Rango de medición de temperatura: $-40^{\circ}C$ a $80^{\circ}C$
	Rango de medición de humedad: De 0 a 100 % RH
Resistencia	1.2 k Ω
Fuente de alimentación	5V
Anemómetro UT363BT	Velocidad del viento de 0 a 30 m/s

4.1.2. Programación del sistema adquisidor

El proceso de medición de la temperatura y la humedad está definido por el algoritmo de control encargado de gestionar el funcionamiento de los sensores DS18B20 y DHT22. Se declaran las variables de tipo entero con los nombres de "*SENSOR*", "*TEMPERATURA*" y "*HUMEDAD*", ver Fig. 4.1.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#include <DHT.h> // Importa la librería DHT
#include <DHT_U.h>

int SENSOR = 2; //pin DATA de DHT22 a pin digital 2
int TEMPERATURA;
int HUMEDAD;

DHT dht(SENSOR, DHT22); //creación del objeto, cambiar segundo parametro.
                        //por DHT11 si se utiliza en lugar del DHT22.

//Pin donde se conecta el bus 1-Wire
const int pinDatosDQ = 9;

//instancia a las clases Onewire y DallasTemperature.
OneWire oneWireObjeto(pinDatosDQ);
DallasTemperature sensorDS18B20(&oneWireObjeto);
```

Figura 4.1 Código de variables de interés

Se declaran las variables indispensables y se incluyen las librerías necesarias para garantizar el adecuado funcionamiento de los sensores dentro del programa. Asimismo, se definen tres variables enteras de interés y una constante asociada al pin de datos, empleada para la conexión de los sensores de temperatura y humedad, ver Fig. 4.2.

```
void setup () {

Serial.begin(9600); //Iniciación de monitor serial.
dht.begin(); //Iniciación de sensor.

//Iniciamos la comunicación serie.
Serial.begin(9600);
//Iniciamos el bus 1-Wire
sensorDS18B20.begin();
Serial.println
("LABEL, Fecha, Hora, TNorte, TSur, TEste, TOeste, Ttecho, Tventana, Tcentro, Hcentro");

}
```

Figura 4.2 Código de monitor serial

Se inicia el monitor serial y se activa el sensor de humedad mediante la función `Serial.println`. Además, se definen las etiquetas correspondientes a los datos registrados durante el proceso de medición de las variables de interés, ver Fig. 4.3.

```
void loop() {
  TEMPERATURA=dht.readTemperature(); //Obtención de valor de
  temperatura.
  HUMEDAD=dht.readHumidity(); //Obtención de valor de Humedad.

  //Mandamos comandos para toma de temperatura a los sensores.
  sensorDS18B20.requestTemperatures();
  float TNorte=sensorDS18B20.getTempCByIndex(0);
  float TSur=sensorDS18B20.getTempCByIndex(1);
  float TEste=sensorDS18B20.getTempCByIndex(2);
  float TOeste=sensorDS18B20.getTempCByIndex(3);
  float Ttecho=sensorDS18B20.getTempCByIndex(4);
```

Figura 4.3 Código de almacenamiento de variables de interés

Se definen las variables destinadas a almacenar los valores correspondientes al orden de conexión de los sensores de temperatura según su ubicación en los ejes cardinales, así como los datos de humedad y temperatura en el centro de la habitación utilizada para las pruebas experimentales preliminares, ver Fig. 4.4.

```
//Leemos y mostramos los datos de los sensores DS18B20.
Serial.print("DATA,DATE,TIME, ");
Serial.print(TNorte,2);
Serial.print(",");
Serial.print(TSur,2);
Serial.print(",");
Serial.print(TEste,2);
Serial.print(",");
Serial.print(TOeste,2);
Serial.print(",");
Serial.print(Ttecho,2);
Serial.print(",");

Serial.print(TEMPERATURA);
Serial.print(",");
Serial.print(HUMEDAD);
delay(1000);
}
```

Figura 4.4 Código de captura de valores de las variables de interés

Los valores se registran y muestran en pantalla siguiendo el orden previamente establecido. Las conexiones deben mantener el mismo patrón para asegurar que la temperatura y la humedad se estén midiendo correctamente, ver Fig. 3.8. El código se compiló sin inconvenientes.

4.1.3. Construcción de la tarjeta adquirentora de datos

El DS18B20 es un sensor de temperatura capaz de convertir una señal analógica en una señal digital, facilitando dicha conversión mediante una interfaz de configuración que permite transferir la información obtenida hacia el microcontrolador a través del protocolo 1-Wire. Como su nombre lo indica, este protocolo requiere únicamente una línea de datos para transmitir la información, lo que permite establecer comunicación entre el microcontrolador y varios sensores DS18B20 simultáneamente. El bus 1-Wire se basa en un esquema de señalización, direccionamiento y arbitraje que posibilita comunicaciones bidireccionales entre un dispositivo maestro y uno o varios periféricos a través de una sola conexión, ver la Fig. 4.5.

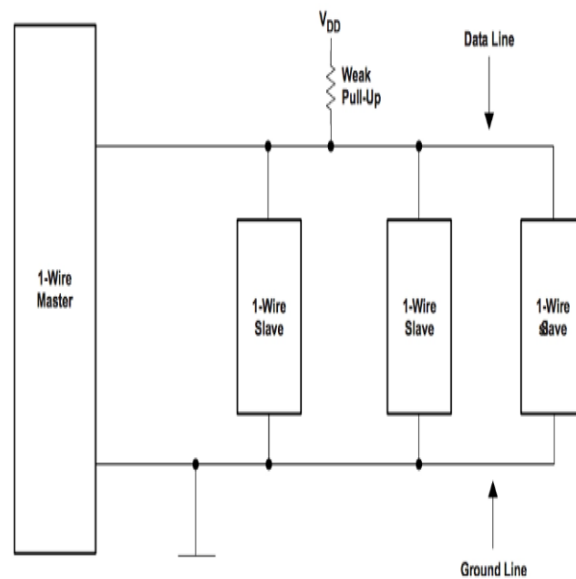


Figura 4.5 Topología de conexión bus 1-wire [41]

La conexión más simple del sensor muestra que el integrado cuenta con tres pines: el pin 1 corresponde a la masa o tierra física, el pin 2 se utiliza como entrada/salida digital del sensor, y el pin 3 está destinado al voltaje de alimentación, que puede oscilar entre 3.3 V y 5 V, ver Fig. 4.6.

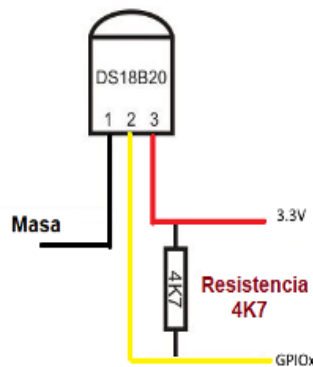


Figura 4.6 Configuración de conexión del sensor de temperatura DS18B20

El sensor de temperatura DS18B20 permite la conexión de múltiples sensores utilizando un único pin de datos. Los sensores adicionales se conectan en paralelo al sensor principal, de modo que la señal 1-Wire se comparte entre todos los dispositivos. Este tipo de configuración se conoce como modo parásito, ver Fig. 4.7.

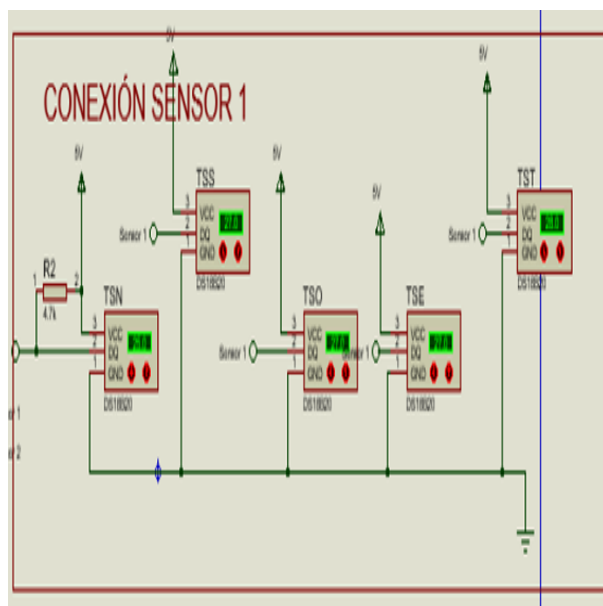


Figura 4.7 Conexión tipo parásito del sensor DS18B20

La conexión de los sensores incluye una resistencia de tipo pull-up, que consiste en elevar la tensión de entrada o salida de un circuito lógico mientras se encuentra en reposo (es decir, cuando no hay datos de entrada), manteniéndola en 1 lógico. Esto evita lecturas erróneas en caso de que el puerto no tenga nada conectado o no esté recibiendo señal. Generalmente, la resistencia se coloca entre el puerto de lectura y la fuente de voltaje, ver Fig. 4.8.

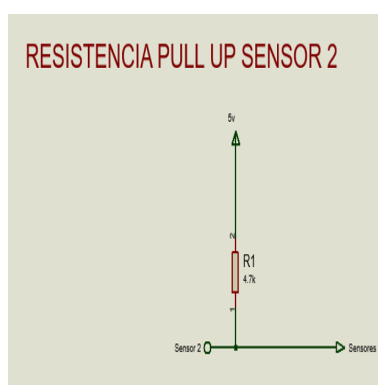


Figura 4.8 Conexión pull up

Para establecer la comunicación con el sensor de temperatura DS18B20, se requiere una resistencia pull-up en el pin 2. Por lo tanto, se deben considerar los valores de las resistencias pull-up, los cuales dependen de la longitud del cableado del sensor, ver la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valor de la resistencia pull up

Distancia	Valor de resistencia
5 Metros	4.7 k Ω
5 a 10 Metros	3.3 k Ω
10 a 20 Metros	2.2 k Ω
20 a 50 Metros	1.2 k Ω

El DHT22 es un sensor digital de temperatura y humedad relativa, de buen rendimiento y bajo costo. Este integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, mostrando los datos mediante una señal en el pin de datos. El rango de medición del sensor DHT22 es de -40°C a 80°C , con una resolución de 0.1°C . La configuración de conexión del sensor es relativamente práctica, ver Fig. 4.9. La conexión del sensor DHT22 se compone de cuatro pines:

- **Pin 1 (VCC):** entrada de voltaje, en un rango de 3.3 V a 5 V.
- **Pin 2 (DATA):** pin de señal digital.
- **Pin 3 (NC):** usualmente no se utiliza.
- **Pin 4 (GND):** conexión a tierra.

Para el uso de este sensor se recomienda emplear una resistencia de 4.7 k Ω en modo “pull-up” entre el pin de datos (2) y el pin VCC (1).

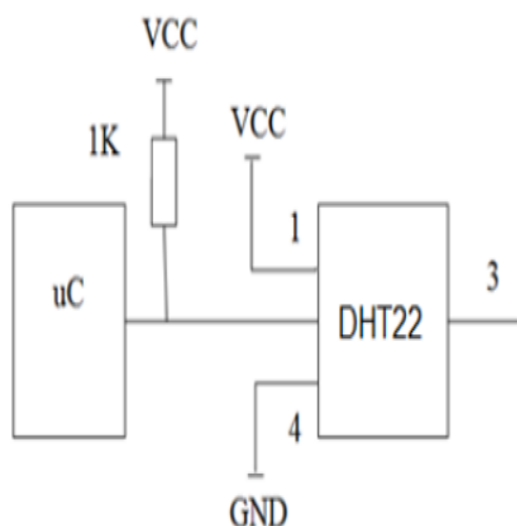


Figura 4.9 Conexión DHT22 [41]

Una parte fundamental del desarrollo experimental consiste en adquirir mediciones en nueve puntos diferentes dentro de una habitación. Por lo tanto, se presenta el esquema del circuito electrónico diseñado para cubrir las necesidades experimentales, ver Fig. 4.10. Se utilizaron ocho sensores DS18B20 y un sensor de temperatura/humedad DHT22 para adquirir los datos en la habitación, empleando un circuito esquemático diseñado en el software PROTEUS.

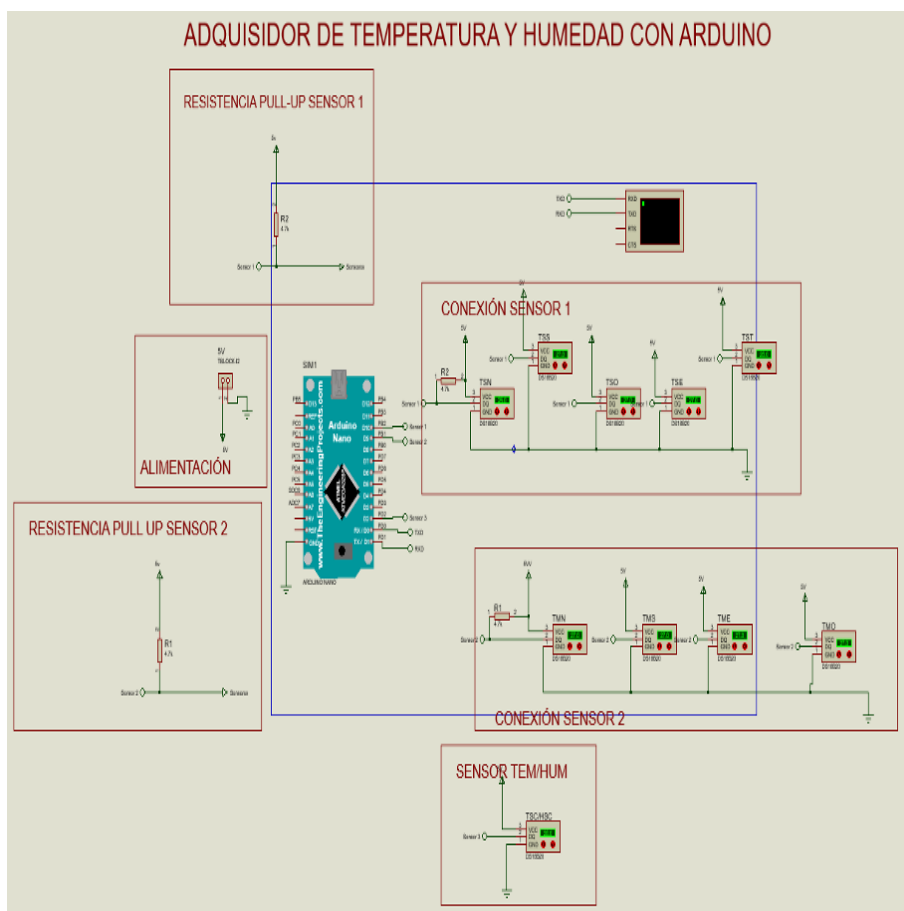


Figura 4.10 Esquemático del circuito en PROTEUS

El diseño modelado en el software PROTEUS permitió realizar las pistas de los componentes electrónicos para desarrollar la placa de circuito impreso (PCB), ver Fig. 4.11. Los componentes electrónicos se soldaron a la tarjeta adquirente de datos basándose en un diseño en modelo CAD, que funcionó como guía para la aplicación y construcción, ver Fig. 4.12.

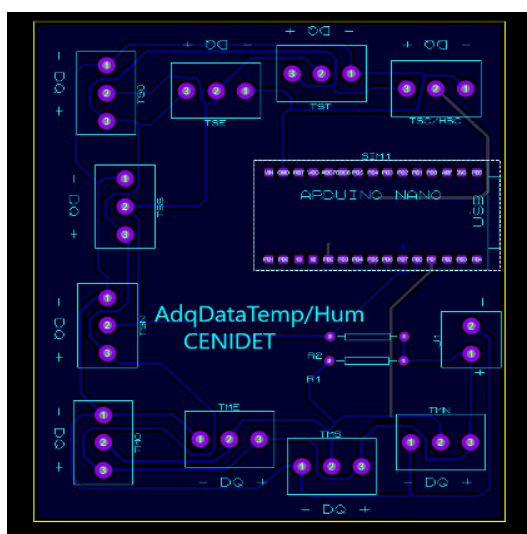


Figura 4.11 Pistas para la construcción de la placa experimental

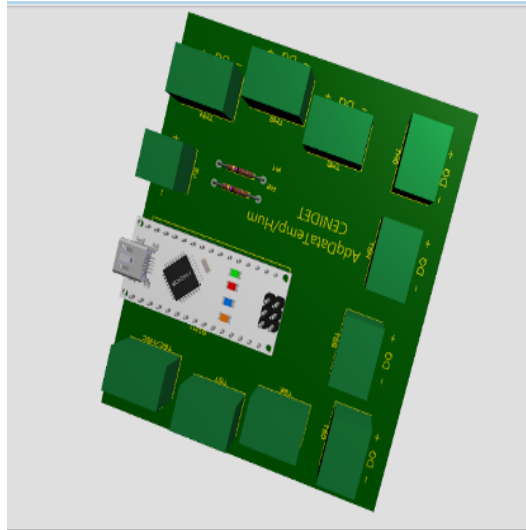


Figura 4.12 Visualización en 3D de la placa experimental

4.1.4. Resultados experimentales

Los sensores DS18B20, cuyo uso es medir la temperatura, se distribuyen a lo largo de la habitación de estudio, adheridos a los muros, y se establecen tres en el centro de la misma. En la ventana de entrada se posiciona un anemómetro que mide la temperatura y la velocidad del flujo de aire entrante; este se sitúa en el centro de la ventana. La humedad relativa se mide en el centro de la habitación de estudio con un sensor DHT22. La adquisición de datos se realizó por medio de la tarjeta Arduino, en conjunto con el capturador de datos PLX-DAQ. Los sensores fueron enumerados del 1 al 10 para identificar la posición que ocupa cada uno en la habitación de estudio, ver Fig. 4.13 y ver Tabla 4.3.

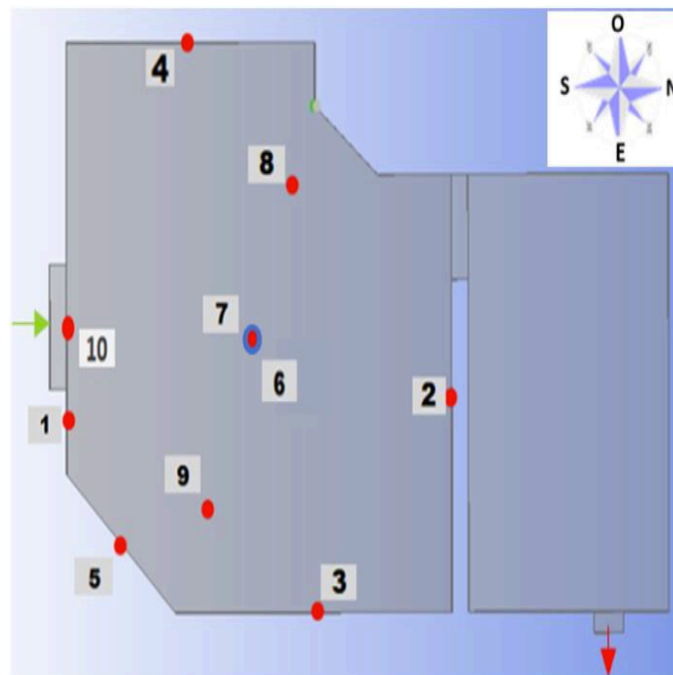


Figura 4.13 Ubicación de los sensores en la habitación experimental

Tabla 4.3 Nomenclatura utilizada para cada sensor

Numeración	Nomenclatura	Descripción
1	TMS	Temperatura interior muro sur
2	TMN	Temperatura interior muro norte
3	TME	Temperatura interior muro este
4	TMO	Temperatura interior muro oeste
5	TMI	Temperatura interior muro este en diagonal
6	Ttecho	Temperatura interior techo
7	TC	Temperatura en el centro de la habitación
8	TCO	Temperatura en el lado oeste de la habitación
9	TCE	Temperatura en el lado este de la del habitación
10	Sv	Sensor de velocidad

El sistema de adquisición de datos, en conjunto con los sensores, se emplaza en la habitación de estudio, ver Fig. 4.14. Los sensores se fijaron con cinta adhesiva de doble cara a la envolvente de la habitación. Se destina un equipo de cómputo conectado directamente al adquisidor para la captura de datos. Las mediciones se efectuaron durante la temporada de verano, del 27 de julio al 4 de agosto, con un intervalo de medición de 1 segundo. La temperatura registrada por los diferentes sensores a lo largo de los días medidos proporciona datos que se grafican en curvas. Esto indica un comportamiento predecible de la temperatura, ya que alcanza su punto máximo a una hora determinada del día y disminuye durante la tarde y la noche; además, la temperatura del techo es la más elevada, como es de esperarse durante el verano, ver Fig. 4.15.



Figura 4.14 (1) Instalación de sensor de temperatura (2) Instalación de sensor de velocidad (3) Prueba de medición de temperatura en el centro de la habitación (4) Ventana de entrada de viento

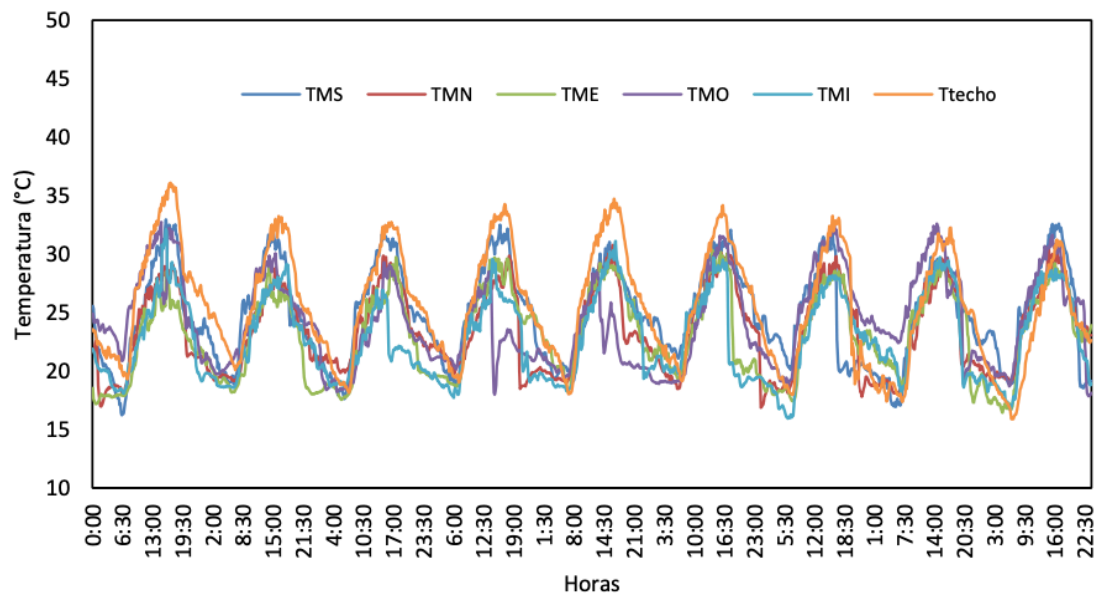


Figura 4.15 Comportamiento de la temperatura en la habitación experimental

El análisis de datos experimentales de la habitación de estudio, nos permitió obtener las condiciones de frontera para realizar la simulación numérica. Estas condiciones se determinaron mediante la búsqueda de un estado cuasi estacionario, que nos permite identificar el comportamiento del fluido en una hora crítica del día. En particular es de las 15:00 a las 16:00 horas del día 2 de agosto, ver Fig. 4.16, donde nuestras variables de interés no tienen cambio significativo en este lapso, en este intervalo de tiempo se capturaron los datos de la temperatura en la superficie interior de las paredes y la velocidad del aire en el centro de la ventana de entrada de la habitación, ver Fig. 4.17.

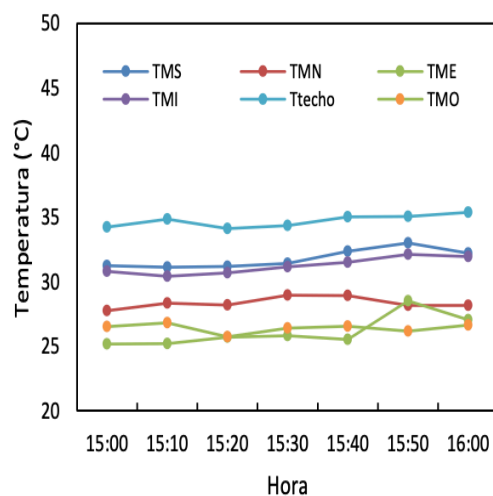


Figura 4.16 Temperatura de las paredes en un estado cuasi-estacionario

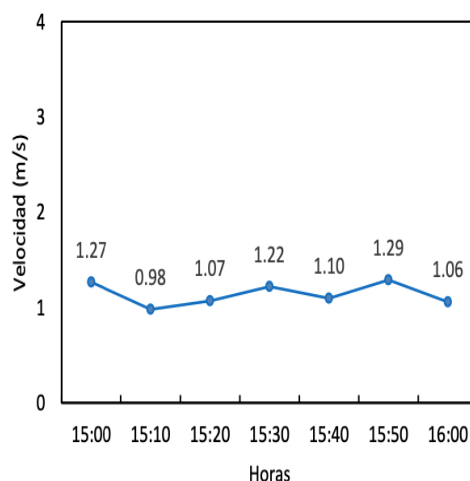


Figura 4.17 Velocidad en la ventana de entrada en el estado cuasi-estacionario

4.2. Estudio numérico

La etapa numérica se centra en la implementación de un proceso de simulación orientado a analizar el comportamiento de las variables de interés dentro de la habitación de estudio.

4.2.1. Modelo físico

En el modelo físico de la habitación de estudio se consideraron puertas y ventanas abiertas, simulando las mejores condiciones de ventilación natural. Las condiciones de frontera dinámicas corresponden a la velocidad de entrada y la presión de salida en las ventanas de entrada y salida, respectivamente. El modelo virtual en CAD permite obtener una perspectiva de la estructura de la habitación de estudio. Este levantamiento estructural digital se realizó con el software ANSYS Fluent, aplicando la herramienta de diseño SpaceClaim, ver Fig. 4.18.

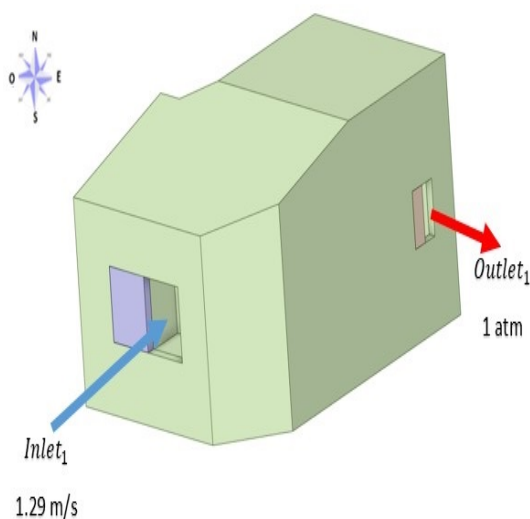


Figura 4.18 Modelo físico

4.2.2. Discretización del volumen de control

Para generar el modelo discreto o malla se recomienda utilizar el elemento más simple para describir el fenómeno. También hay que utilizar el refinamiento que capture el fenómeno físico dominante y refinar en caso de ser necesario en regiones con grandes gradientes de velocidad. Para este estudio se utilizó un mallado uniforme automático, ver Fig. 4.19, este proceso de solución CFD se aplica en el volumen interior de la habitación de estudio, es decir, el fluido que se considera dentro de la misma es el aire.

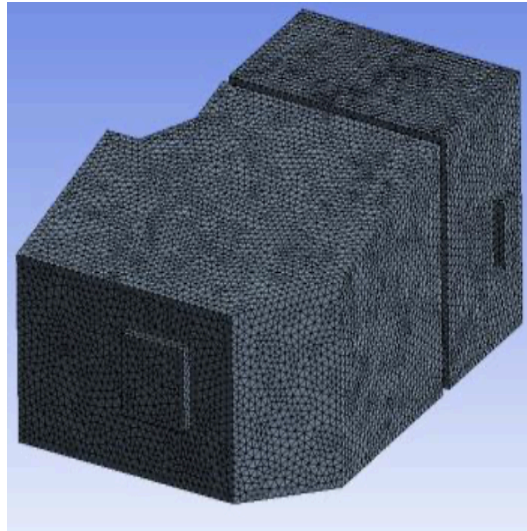


Figura 4.19 Discretización del dominio de control

4.2.3. Modelo matemático

El modelo matemático utilizado se muestra en la sección 2.2.

4.2.4. Establecimiento de las condiciones de frontera

Los resultados experimentales presentados en la sección 4.1.4 permiten establecer las condiciones de frontera de temperatura a partir del estado cuasi-estacionario. Es decir, se realiza un promedio de las mediciones capturadas por la tarjeta adquisidora de datos en cada muro, durante el intervalo de 15:00 a 16:00 horas del día 2 de agosto, ver Fig. 4.16. Para determinar la condición de frontera de velocidad, se selecciona la misma hora y se promedian los valores cada 10 minutos, ver Fig. 4.17. Para obtener las mejores condiciones de ventilación, se contempla seleccionar el valor mayor promedio, que es 1.29 m/s, ver Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Condiciones de frontera obtenidas experimentalmente

Condiciones de frontera
Paredes y techo
TMS 32.98 °C
TMN 28.15 °C
TME 28.51 °C
TMO 26.16 °C
TMI 32.12 °C
Ttecho 35.03 °C
Ventanas
Inlet1 1.29 m/s
Outlet 1 atm
TIV 29 °C

4.2.5. Análisis de independencia de malla

El análisis de independencia de malla se realizó con el objetivo de evaluar la influencia del refinamiento espacial sobre la solución numérica y optimizar el tiempo de cómputo sin comprometer la precisión de los resultados. Para ello, se consideraron cinco mallas con diferentes tamaños de elemento, ver Fig. 4.21, y para cada una se ejecutaron simulaciones numéricas bajo las condiciones de frontera especificadas en la Sección 4.2.4. La comparación entre mallas se llevó a cabo a partir de los perfiles de velocidad extraídos a lo largo de una línea de muestreo representativa del dominio, ubicada en el centro de la habitación, desde el centro de la abertura de la ventana hasta el muro intermedio, a una altura de 1.5 m, ver Fig. 4.20. Esta línea permite evaluar de forma consistente las variaciones del campo de velocidad en una región de interés relevante para el análisis de ventilación interior.

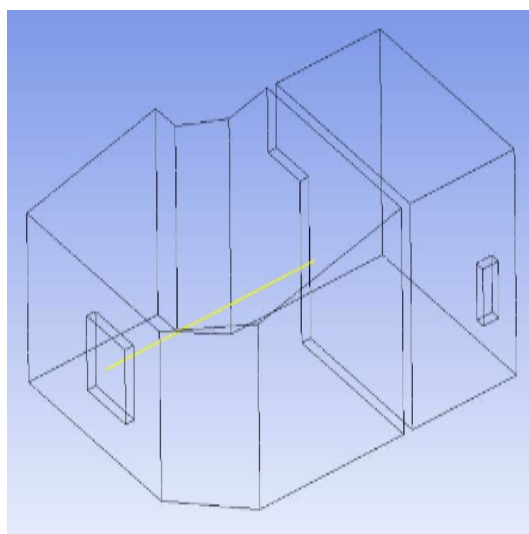


Figura 4.20 Trazado de línea en el centro de la ventana de entrada para análisis de convergencia

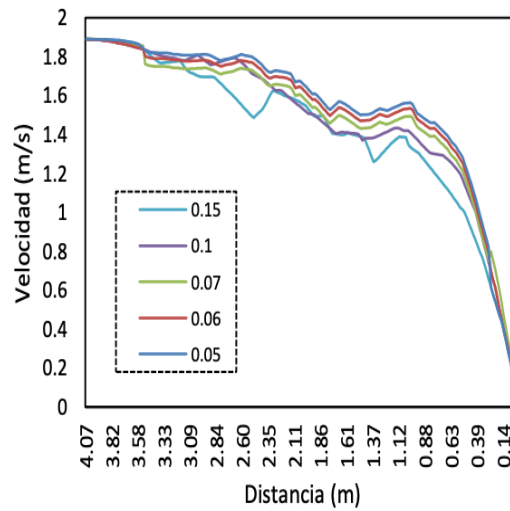


Figura 4.21 Comportamiento de diferentes tamaños de malla

Tabla 4.5 Análisis de independencia de malla

Tamaño de elemento (m)	Comparativa (m)	RMSE (%)
0.1	0.15	22.5672
0.07	0.1	14.1963
0.06	0.07	4.0026
0.05	0.06	2.9376

Para cuantificar las diferencias entre las soluciones obtenidas con mallas sucesivas, se empleó el error cuadrático medio (RMSE), calculado a partir de los valores de velocidad en la línea de muestreo. El uso del RMSE resulta adecuado [45], ya que proporciona una medida global de la discrepancia entre soluciones numéricas, penalizando de manera más significativa las desviaciones de mayor magnitud, lo cual es particularmente relevante en estudios de flujo interior, donde los gradientes de velocidad pueden ser elevados. En estudios CFD de ventilación interior [44], un valor de $\text{RMSE} \leq 5\%$ entre mallas sucesivas suele considerarse adecuado para asumir independencia de malla, especialmente cuando el interés se centra en los perfiles de velocidad y no en la estimación estricta del error global de discretización. Los valores de RMSE (véase la Tabla 4.5) muestran una disminución progresiva conforme se reduce el tamaño del elemento, lo que indica una convergencia espacial de la solución. En particular, al comparar las mallas con tamaños de elemento de 0.07 m y 0.06 m, el RMSE presenta una reducción significativa, mientras que un refinamiento adicional hasta 0.05 m produce únicamente una disminución marginal del error. El RMSE obtenido entre mallas sucesivas es inferior al 5 %, valor que se considera indicativo de independencia de malla en estudios CFD de ventilación interior [44]. Esto confirma que las diferencias entre soluciones numéricas son marginales y que el refinamiento adicional de la malla no aporta mejoras significativas en los resultados. Con base en este criterio, se concluye que un tamaño de elemento de 0.06 m garantiza la independencia de malla para el análisis del campo de velocidad, representando un compromiso adecuado entre precisión numérica y

costo computacional. En consecuencia, dicho tamaño fue seleccionado para el desarrollo de las simulaciones numéricas posteriores.

4.3. Validación

Se efectúa una comparativa entre los valores obtenidos experimentalmente mediante la implementación de sensores de medición de temperatura en el centro de la habitación de estudio, ver Fig. 4.22, y los datos de la simulación numérica. Estos datos deben presentar un margen de error menor a ± 0.5 °C, debido a la incertidumbre del sensor DS18B20 utilizado en el desarrollo experimental. En la comparativa se observa una diferencia máxima de 0.47 °C, lo que indica que las simulaciones numéricas se encuentran dentro del rango de validación, ver Tabla 4.6.

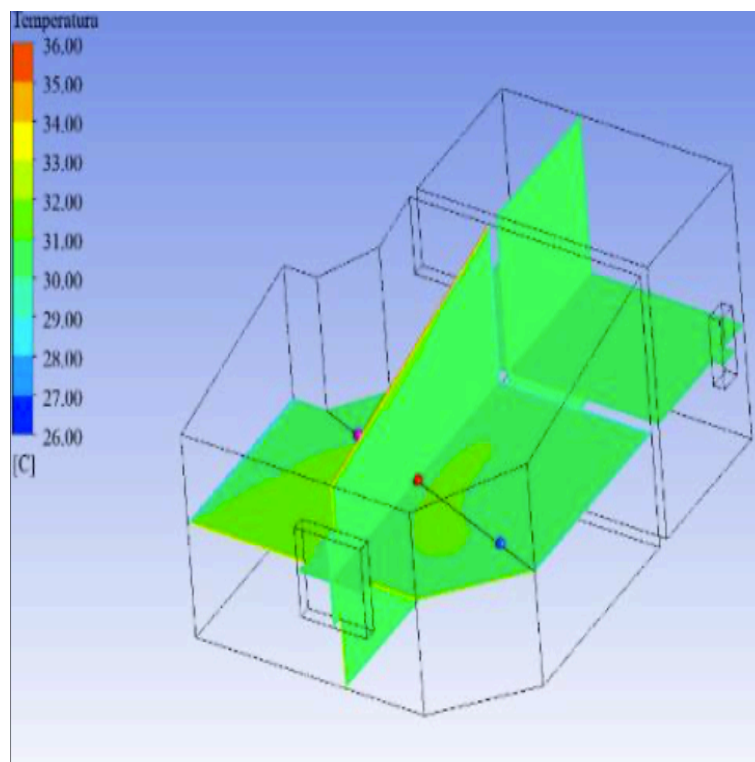


Figura 4.22 Campos de temperatura con puntos en centro de la habitación

Tabla 4.6 Comparativa de resultados numéricos y experimentales

Puntos	Nombre del punto	Temperatura experimental (°C)	Temperatura numérica (°C)	Diferencia
Rojo	TC	30.14	30.37	0.23
Azul	TCE	29.96	30.43	0.47
Rosa	TCO	29.74	30.12	0.38

4.4. Resultados numéricos

Para estipular las condiciones de ventilación y confort térmico en la habitación de estudio, se realizó un análisis que tiene como objetivo calcular el confort térmico y la ventilación utilizando las condiciones de frontera mencionadas en la sección 4.2.4 y con ayuda del análisis de independencia de malla realizado en la sección 4.2.5

4.4.1. Análisis de ventilación y confort térmico

El análisis de confort térmico se basa en evaluar los factores ambientales y humanos que influyen en la percepción del bienestar térmico de los usuarios, con el propósito de determinar si las condiciones del espacio cumplen con los niveles de confort establecidos en normas internacionales como la ASHRAE [27].

- Parámetro de ventilación

Los campos de velocidad, ver Fig. 4.23, muestran que el aire entra a la habitación como un chorro de alta velocidad desde la ventana de entrada y se desplaza principalmente siguiendo una trayectoria preferencial definida por la geometría interna. Cerca de la ventana de entrada, las velocidades son elevadas, mientras que disminuyen rápidamente conforme el aire avanza, debido a la difusión del chorro y a la interacción con el aire interior. La presencia de elementos internos y cambios geométricos provoca una redistribución del flujo, generando desviaciones del chorro principal y favoreciendo la aparición de regiones de separación y recirculación. Estas zonas, caracterizadas por velocidades bajas, indican áreas donde el movimiento del aire es más lento y el tiempo de residencia del fluido es mayor. Desde el punto de vista físico, estas recirculaciones contribuyen a la mezcla del aire; sin embargo, también pueden convertirse en regiones con menor eficiencia de renovación si su extensión es significativa. En las regiones alejadas de la ventana de entrada se observan velocidades moderadas a bajas, resultado de la disipación progresiva de la energía cinética y de los efectos de fricción con las superficies sólidas. Este patrón sugiere que el flujo principal no impacta directamente la zona ocupada, sino que llega a ella ya atenuado, lo cual no es deseable para generar una ventilación adecuada. En términos de desempeño global, el patrón observado indica que el sistema de ventilación logra transportar el aire a través del recinto y promover la mezcla, aunque con la presencia inevitable de zonas de baja velocidad asociadas al confinamiento geométrico. Este comportamiento es representativo de recintos reales y subraya la importancia de complementar el análisis de velocidad con la evaluación de la ventilación, en este caso se aplica el concepto de los cambios de aire por hora (ACH), que permiten determinar cuántas veces se renueva el aire dentro del espacio para obtener una ventilación adecuada. La norma ASHRAE [27] establece que los ACH para una habitación deben estar entre 60-70. El resultado obtenido indica 22.06 ACH, ver Tabla

4.7, lo que conduce a la conclusión de que la habitación no cuenta con una ventilación adecuada.

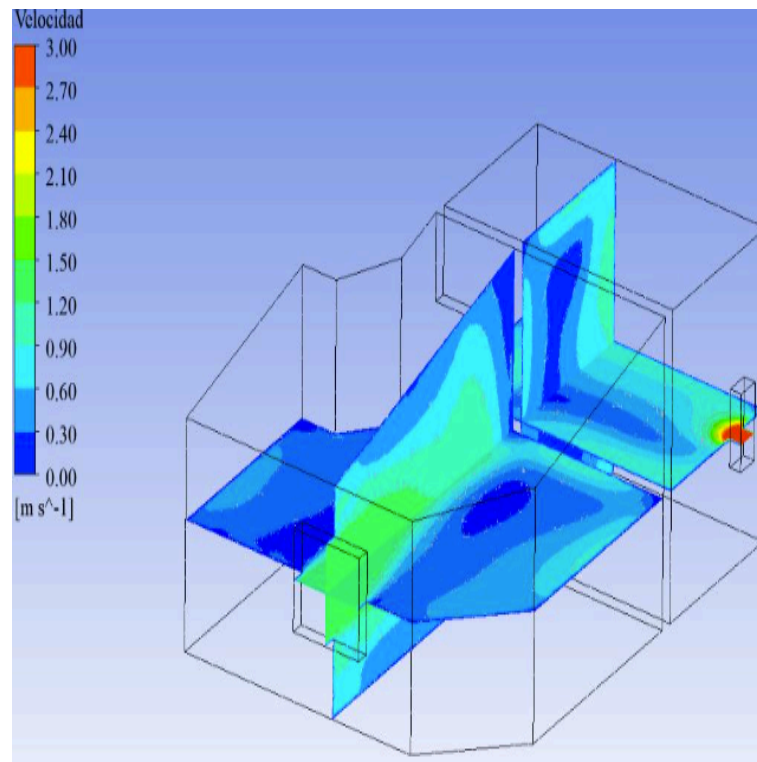


Figura 4.23 Campos de velocidad en la habitación de estudio

Tabla 4.7 Datos de ventilación

Zona	Volumen (m^3)	Velocidad de entrada (m/s)	Area de entrada (m^2)	ACH
Habitación	64.15	1.29	1	22.06

■ Parámetros de confort térmico

La distribución de los campos de temperatura en el interior de la habitación, obtenida a partir de la simulación numérica, indica que los valores más elevados se concentran principalmente cerca del muro sur y en la zona del techo del recinto, ver Fig. 4.22. Asimismo, los muros circundantes presentan temperaturas que oscilan entre $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que evidencia un ambiente térmico generalizado con niveles de temperatura elevados. Esta condición térmica constituye el punto de partida para el análisis de confort, ya que influye directamente en la percepción térmica de los ocupantes. En este contexto, se presenta la distribución del índice PMV, ver Fig. 4.24, dentro del recinto, lo que permite evaluar directamente las condiciones de confort térmico percibido en función del patrón de ventilación previamente analizado. La distribución del PMV no es uniforme y se encuentra estrechamente relacionada con el campo de velocidades del aire: las zonas con recirculación o movimiento de aire reducido coinciden con regiones donde el confort térmico se desplaza hacia valores de mayor incomodidad. En particular, se identifican regiones

localizadas con PMV más elevado (tonos naranjarojo), lo que sugiere que el confort térmico no está garantizado de manera homogénea en todo el recinto, situación especialmente desfavorable en espacios donde los ocupantes permanecen largos periodos o cambian de posición. Estas áreas se asocian principalmente a zonas alejadas de la impulsión, donde la baja velocidad del aire limita la remoción efectiva de calor.

De forma complementaria, la distribución del índice PPD, ver Fig. 4.25, permite identificar con mayor claridad la magnitud y extensión espacial del discomfort térmico. En el plano analizado se observa que gran parte del recinto presenta valores de PPD superiores al 10 %, con amplias regiones que alcanzan o se aproximan al 20 %, lo que implica que una fracción significativa de los ocupantes podría sentirse térmicamente insatisfecha. Las zonas de mayor PPD se localizan en áreas parcialmente confinadas por elementos internos y alejadas de la impulsión, coincidiendo con regiones de bajo movimiento del aire. Esto confirma que el sistema de ventilación no logra influir eficazmente en todo el volumen ocupado, siguiendo trayectorias preferenciales que dejan volúmenes con insuficiente ventilación. En contraste, cerca de la abertura de suministro y a lo largo de la trayectoria principal del chorro de aire se identifican valores más bajos de PPD (tonos azulverde), lo que evidencia una mejora local del confort térmico. No obstante, esta mejora es espacialmente limitada y no se extiende de manera homogénea al resto del recinto, lo que pone de manifiesto una dependencia excesiva del chorro de impulsión y una baja robustez del sistema frente a variaciones operativas. Además, la presencia de gradientes graduales de PPD entre distintas zonas indica la existencia de diferencias térmicas perceptibles incluso a distancias cortas, lo que puede generar percepciones desiguales de confort entre los ocupantes. Finalmente, los valores globales obtenidos de PMV y PPD son 0.68 y 15 %, respectivamente. De acuerdo con los criterios establecidos en la norma [27], que define límites de confort térmico de -0.5 a 0.5 para el PMV y valores de PPD 10 %, se concluye que no existen condiciones adecuadas de confort térmico dentro de la habitación de estudio. Estos resultados ponen en evidencia la necesidad de optimizar la estrategia de ventilación con el fin de reducir las zonas críticas de discomfort y mejorar la uniformidad térmica del recinto.

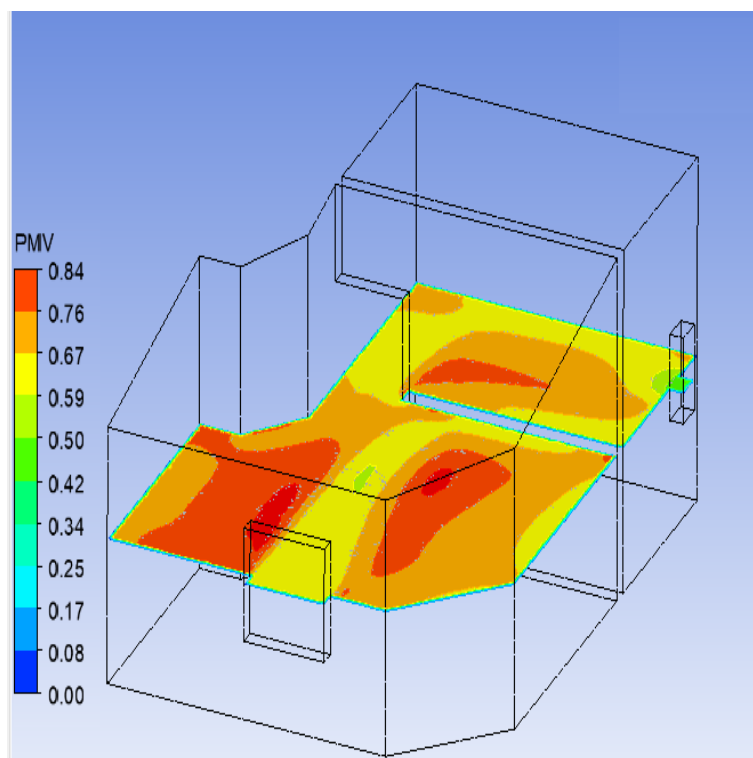


Figura 4.24 Campos de PMV

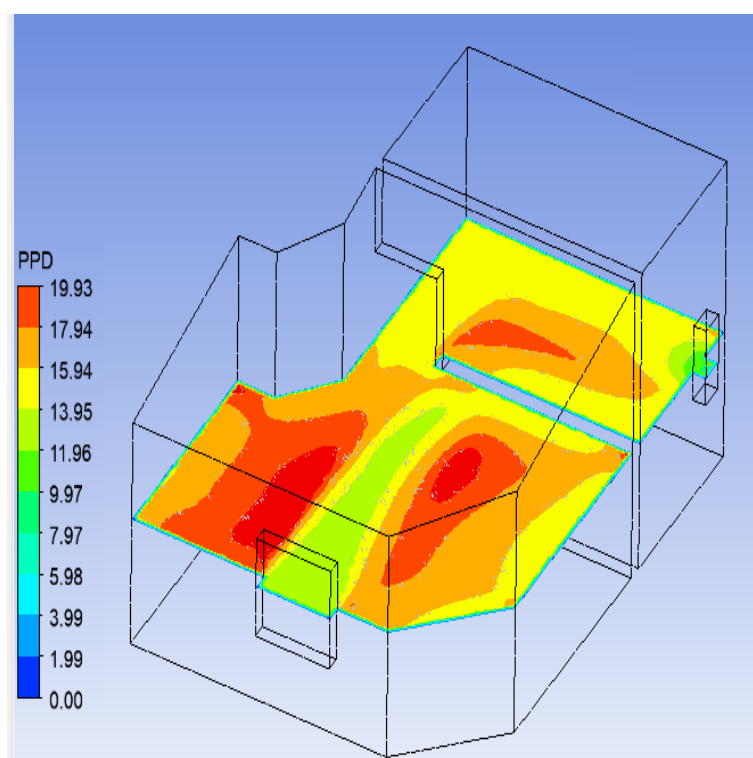


Figura 4.25 Campos de PPD

Capítulo 5

Estudio numérico del flujo de aire sin/con torre de viento

5.1. Modelos físicos

La envolvente de un edificio tiene un impacto significativo en la cantidad de energía requerida para mantener la temperatura interior dentro de un rango confortable. La NOM-020-ENER-2011 busca reducir las ganancias de calor en edificios residenciales mediante un diseño eficiente de la envolvente, disminuyendo así la energía necesaria para su refrigeración. En esta sección se emplearán los modelos CAD elaborados en la sección 2.1.3 de la presente investigación, los cuales corresponden a las configuraciones con y sin TV.

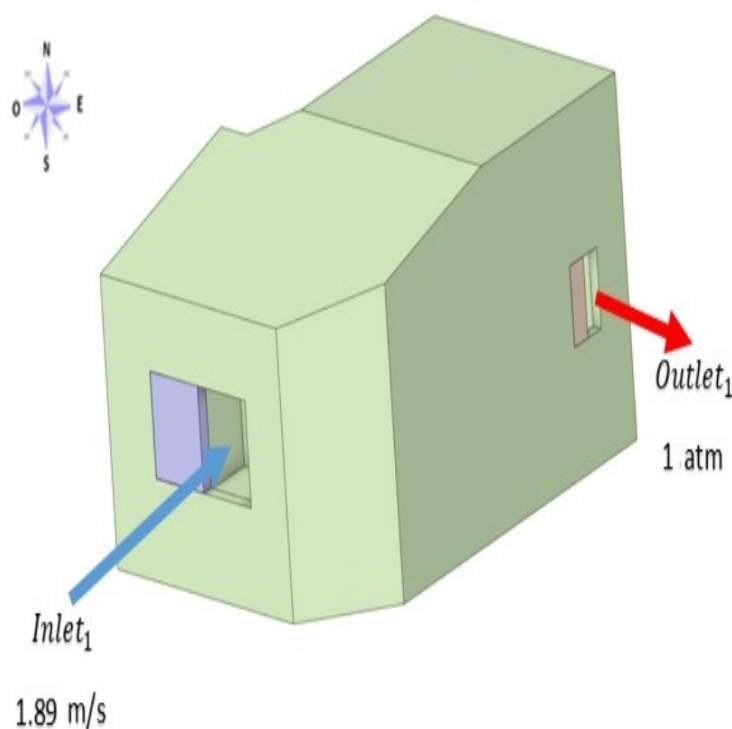


Figura 5.1 Modelo físico desarrollado sin la implementación de una TV

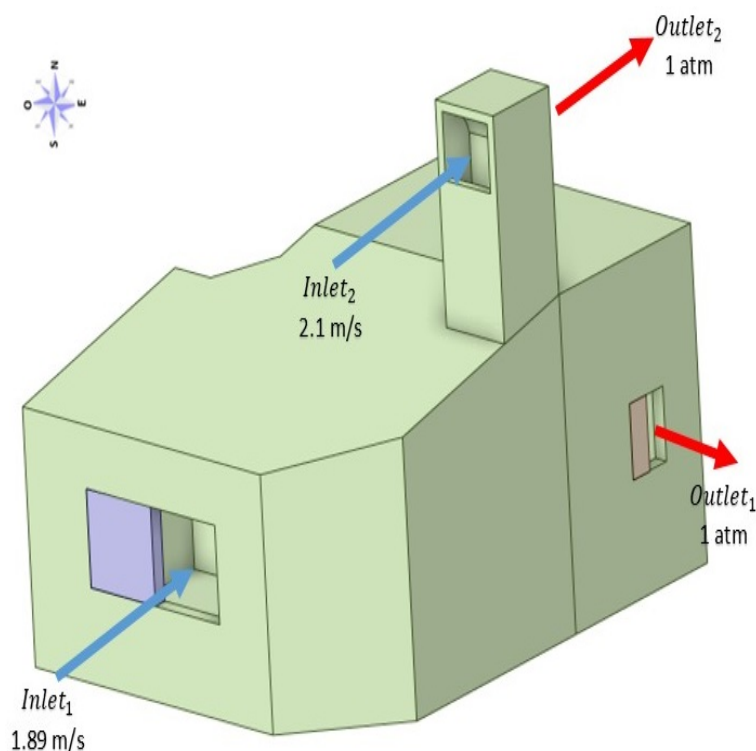


Figura 5.2 Representación del modelo físico equipado con una TV

5.2. Establecimiento de las condiciones de frontera

Para las condiciones de frontera dinámicas se establecieron con base en un análisis de datos obtenidos de la estación solaritmétrica y meteorológica del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (ESM-IER-UNAM), ver Tabla 5.2. Para las condiciones de frontera de transferencia de calor se considera que el suelo y los muros internos son adiabáticos, es decir, que no hay intercambio de calor entre el sistema y su entorno. Los materiales para los muros y el techo se estiman como ladrillo rojo y concreto cuya conductividad térmica es de 0.78 y $1.74 \text{ Wm}^2/\text{K}$ respectivamente, ver Tabla 5.1. Se aplican condiciones de muro masivo establecidas en la norma NOM-020-ENER-2011 [29], la cual se encarga de determinar la eficiencia energética en edificios para uso habitacional considerando el diseño térmico y así lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía.

Tabla 5.1 Propiedades de los materiales de acuerdo con la norma [29]

Muro	Material	Densidad (kg/m^3)	Calor específico ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)	Conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
Sur y Este	Ladrillo	1600	840	0.78
Techo	Concreto	2300	1000	1.74

Tabla 5.2 Condiciones de frontera térmicas de acuerdo con la norma [29] y dinámicas de acuerdo con datos de la estación meteorológica ESM-IER-UNAM.

Muro	Temperatura ($^{\circ}C$)
Sur	28
Este	27
Techo	39
Ventanas	
Inlet1	1.89 m/s
Inlet2	2.1 m/s
Outlet1,Outlet2	1 atm

5.3. Resultados sin torre de viento

Se realiza un estudio de la habitación para determinar el comportamiento de las variables de interés mediante la aplicación de parámetros de ventilación y de confort térmico [27].

5.3.1. Discusión del comportamiento dinámico

Para la simulación numérica se consideraron las mejores condiciones de ventilación natural, estableciendo ventanas abiertas con una entrada de aire ubicada en la ventana sur (Inlet 1) y una salida de presión en la ventana restante (Outlet 1), ver Fig. 5.1, con valores de 1.89 m/s y 1 atm, respectivamente, como se indica en la Tabla 5.2.

Los contornos de velocidad obtenidos muestran que, en la ventana de entrada, como era de esperarse, el flujo de aire presenta valores elevados de velocidad, asociados directamente a la condición de entrada impuesta. No obstante, al propagarse el aire dentro del recinto, ver Fig. 5.3, se evidencia una rápida disipación del chorro, dando lugar a amplias zonas donde la velocidad es cercana a cero. Estas regiones de baja velocidad indican que la distribución del aire dentro de la habitación no es homogénea, lo que compromete la efectividad del proceso de ventilación.

Asimismo, se observa la presencia de zonas de recirculación cercanas a las paredes y esquinas del recinto, donde se generan remolinos que limitan la renovación efectiva del aire, ver Fig. 5.3. Este comportamiento explica por qué un incremento en la velocidad de entrada no se traduce necesariamente en una mejora de las condiciones de ventilación, ya que la energía cinética del flujo se disipa principalmente en estructuras recirculatorias en lugar de favorecer el barrido completo del volumen interior.

Cada habitación cuenta con parámetros específicos para la evaluación de la ventilación, siendo uno de los más relevantes los ACH. Para un recinto con estas características, los valores recomendados de ACH se encuentran entre 60–70 [27]. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que la habitación analizada alcanza únicamente 31.37 ACH, como se muestra en la

Tabla 5.3, valor que se encuentra significativamente por debajo del rango recomendado. Este resultado es consistente con los patrones de flujo observados, ver Fig. 5.3, donde la recirculación y las zonas de aire prácticamente estancado reducen la eficiencia global de la ventilación.

Tabla 5.3 Datos de ventilación

Zona	Volumen (m^3)	Velocidad de entrada (m/s)	Area de entrada (m^2)	ACH
Habitación	64.15	1.89	1	31.37

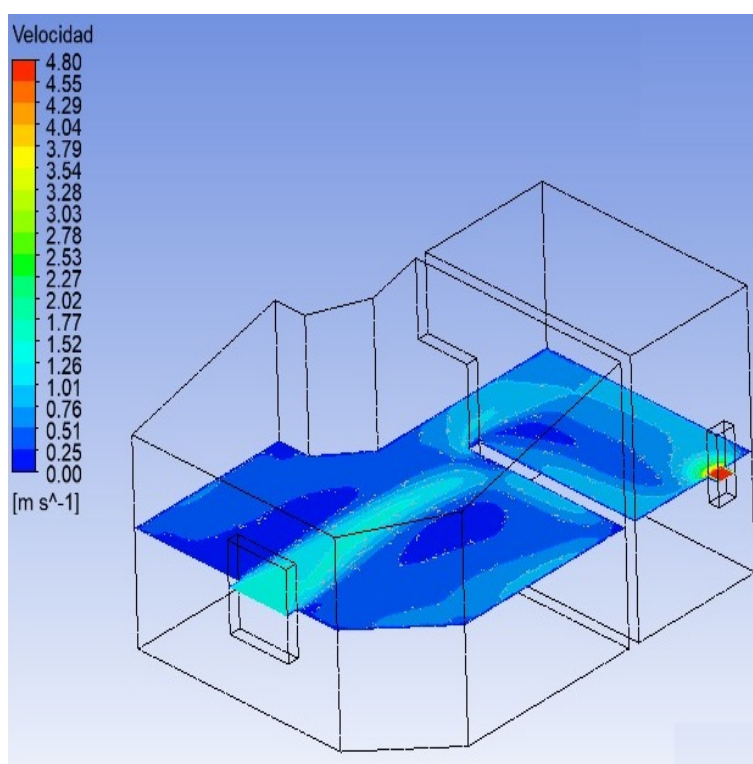


Figura 5.3 Campos de velocidad dentro de la habitación de estudio

5.3.2. Discusión del comportamiento térmico

La simulación numérica realizada permite analizar de manera detallada la distribución espacial del confort térmico dentro de la habitación mediante los índices PMV y PPD. Se presentan los contornos de PMV, ver Fig. 5.4, los cuales evidencian una distribución no uniforme de la sensación térmica en el interior del recinto. Los valores de PMV se mantienen mayoritariamente en un rango positivo, con un valor mínimo de 0.59 y zonas con valores superiores, representadas por tonalidades amarillas y naranjas. Las regiones con mayor PMV se concentran principalmente en la zona central del recinto y en áreas con menor influencia de ventilación, lo cual sugiere una acumulación de calor en estas regiones. Por el contrario, los valores relativamente

más bajos de PMV se localizan cerca de aperturas o zonas donde el intercambio térmico con el exterior es más significativo.

No obstante, incluso en estas áreas, los valores de PMV permanecen por encima del límite inferior de confort, lo que indica que ninguna región del espacio alcanza condiciones térmicamente adecuadas. De manera consistente, se presentan los contornos del índice PPD, ver Fig. 5.5, el cual se deriva directamente del PMV y cuantifica el porcentaje estimado de ocupantes insatisfechos con el ambiente térmico. En esta figura se observa que el valor mínimo de PPD es de 11.96 %, con amplias zonas del recinto mostrando valores superiores, representados por colores verde-amarillos y naranjas. Estas regiones coinciden espacialmente con las áreas de mayor PMV observadas, ver Fig. 5.4, confirmando la relación directa entre ambos índices.

Desde el punto de vista normativo, los valores de PPD observados superan el límite recomendado de 10 %, lo que implica que, incluso bajo las condiciones más favorables dentro del recinto, una fracción significativa de los ocupantes experimentaría incomodidad térmica. La distribución espacial del PPD evidencia que el discomfort térmico no es localizado, sino que afecta a la mayor parte del volumen ocupado, reforzando la conclusión de que el desempeño térmico del espacio es deficiente. Para el cálculo de los índices PMV y PPD se utilizaron como variables de entrada una velocidad promedio del aire de 0.056 m/s y una temperatura del aire de 31.2 °C. La baja velocidad del aire limita los mecanismos de convección y la disipación del calor corporal, mientras que la elevada temperatura del aire constituye el factor dominante que impulsa los valores positivos de PMV. La humedad relativa fue considerada en 28.17 %, valor obtenido a partir del análisis de datos de la ESM-IER-UNAM. Asimismo, se adoptaron un factor de ropaje de 0.5 clo y una M de 1.2 met, representativos de condiciones típicas de ocupación en el espacio analizado.

Bajo estas condiciones, el valor global de PMV obtenido es de 0.66, el cual se encuentra fuera del rango de confort térmico establecido por la normativa internacional ($-0.5 \leq \text{PMV} \leq 0.5$). En consecuencia, el PPD alcanza un valor de 13.86 %, superando el umbral máximo recomendado de 10 %. Estos resultados cuantitativos son plenamente coherentes con la información visual proporcionada, ver Figs. 5.4 y 5.5, las cuales permiten identificar de manera clara las zonas críticas de discomfort térmico dentro del recinto.

En conclusión, el análisis combinado de los resultados numéricos y de los contornos gráficos de PMV y PPD demuestra que la habitación no cumple con las condiciones de confort térmico establecidas por la normativa vigente. La interpretación de las imágenes confirma que el discomfort térmico es generalizado y está asociado principalmente a la elevada temperatura del aire y a la limitada ventilación, lo que sugiere la necesidad de implementar estrategias de mejora en el diseño térmico y en la distribución del aire para alcanzar condiciones aceptables de confort.

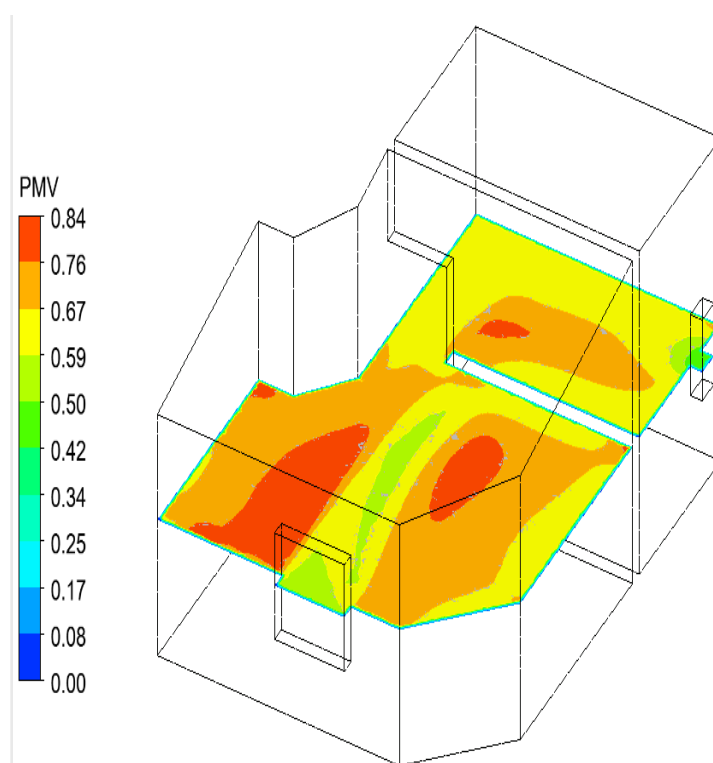


Figura 5.4 Campos de PMV

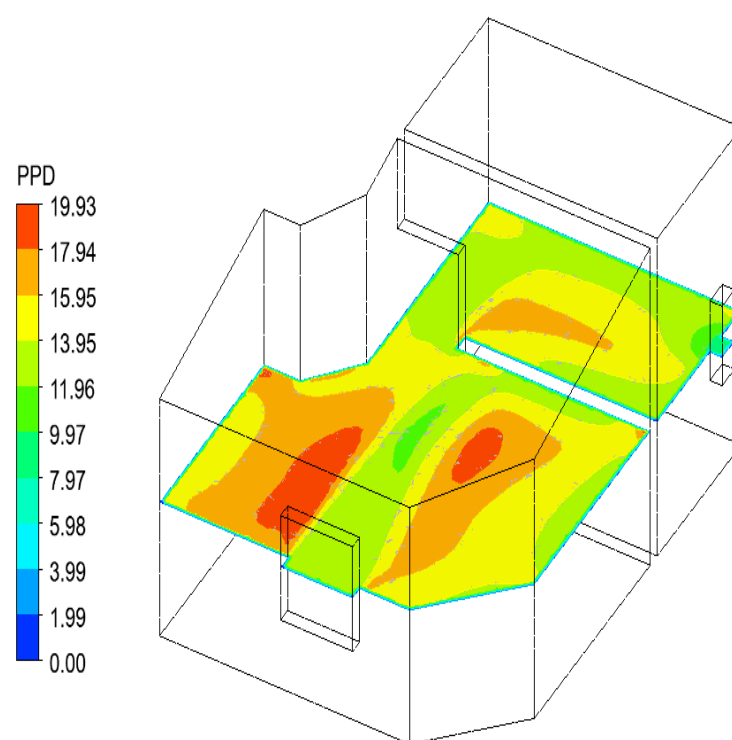


Figura 5.5 Campos de PPD

5.3.3. Resultados con torre de viento

Se efectúa una simulación numérica aplicando un sistema pasivo de climatización, como lo es la TV, para identificar si puede mejorar las condiciones de confort térmico dentro de la habitación de estudio. Estos sistemas han demostrado ser efectivos en las regiones áridas de Oriente Medio, como se revisó en el análisis de literatura de la sección 4.3; sin embargo, no se han aplicado ampliamente en México, aunque sí se han realizado estudios [20, 21, 19, 22, 16, 20, 17, 7, 6]. Utilizando las condiciones de frontera establecidas en la sección 5.2 y la norma NOM-020-ENER-2011 [29], se realiza un estudio del comportamiento de la ventilación dentro de la habitación y de los parámetros de confort térmico.

5.3.4. Discusión del comportamiento dinámico

Los resultados de la simulación numérica proporcionan los campos de velocidad al aplicar el sistema pasivo de climatización TV. Se observa que la velocidad del aire se incrementa en los canales de entrada y salida, particularmente en las cercanías de la salida de la TV (Outlet 2) y de la ventana (Outlet 1), ver Fig. 5.2, debido a la aceleración del flujo en zonas de menor área y al gradiente de presión existente. No obstante, al ingresar al volumen de la habitación, el flujo experimenta una disipación progresiva del impulso, dando lugar a velocidades menores en la zona ocupada.

Esta redistribución del flujo favorece una mejora en la ventilación del recinto, alcanzando velocidades del aire comprendidas entre 0.25 y 1.76 m/s, valores que contribuyen a la remoción de calor y al control del ambiente térmico. Al mismo tiempo, la presencia limitada de remolinos y la reducción de velocidades elevadas en el interior disminuyen el riesgo de disconfort por corrientes de aire, lo cual es favorable desde el punto de vista del confort térmico. En este sentido, las zonas críticas de ventilación se consideran adecuadas, como se muestra en la Fig. 5.6.

Adicionalmente, los criterios de ventilación para una habitación con estas características establecen valores entre 60–70 ACH. El resultado obtenido de 65.23 ACH, ver Tabla 5.4, se encuentra dentro de este intervalo, lo que confirma que el sistema de TV proporciona condiciones de ventilación compatibles con los requerimientos de calidad del aire interior y confort térmico [27].

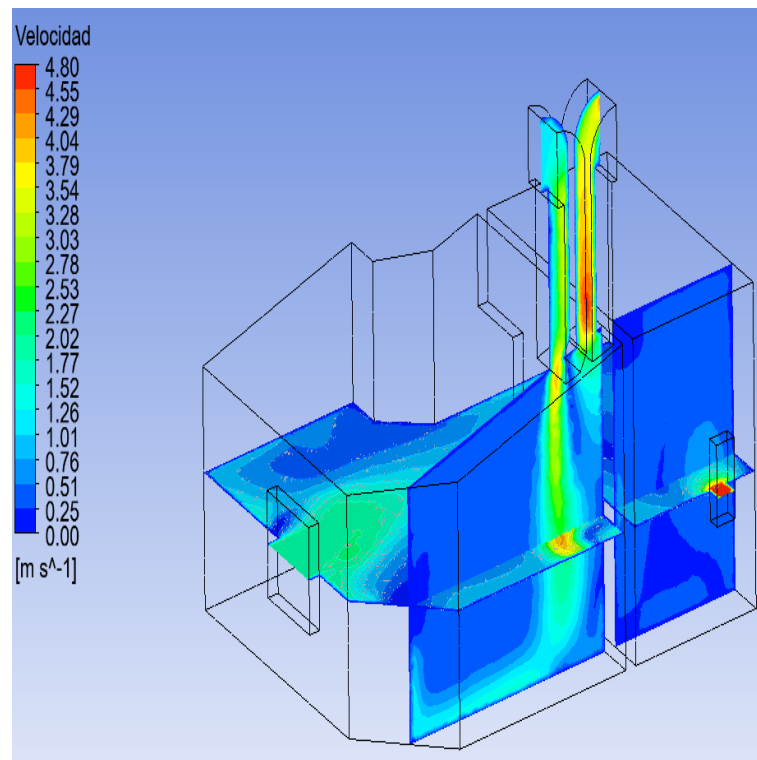


Figura 5.6 Campos de velocidad con TV

Tabla 5.4 Cambios de aire por hora dentro de la habitación

Zona	Volumen (m^3)	v_e (m/s)	v_{eTV} (m/s)	Area de entrada (m^2)	ACH
Habitación	65.35	1.89	2.1	1.25	65.23

5.3.5. Discusión del comportamiento térmico

Este proceso de simulación numérica proporciona los contornos del comportamiento de los parámetros PMV y PPD dentro de la habitación de estudio, ver Figs. 5.7 y 5.8. A partir de los resultados obtenidos, se identifica que el valor máximo de PMV es de 0.45, el cual se encuentra dentro del rango establecido por la normativa correspondiente para la evaluación del confort térmico, indicando una sensación térmica cercana a la neutralidad. De manera consistente, el parámetro PPD alcanza un valor máximo de 8 %, lo que representa una baja probabilidad de personas insatisfechas y cumple con los límites normativos aceptables.

El análisis espacial de los contornos de PMV muestra que la mayor parte del recinto presenta valores comprendidos entre 0 y 0.4, lo que sugiere condiciones térmicas predominantemente confortables. Las zonas con valores ligeramente más elevados de PMV se localizan de manera puntual y no abarcan áreas extensas del volumen ocupado, lo que indica que el sistema de TV favorece una distribución térmica relativamente uniforme dentro de la habitación. Esta distribución está directamente relacionada con el comportamiento del flujo de aire inducido por el sistema pasivo, el cual contribuye a la remoción de calor sin generar sensaciones térmicas extremas.

De forma complementaria, los contornos de PPD reflejan una tendencia coherente con los resultados de PMV. Se observa que amplias regiones del recinto presentan valores de PPD inferiores al 5 %, mientras que las zonas donde este parámetro se aproxima a su valor máximo del 8 % son localizadas y coinciden con regiones donde el PMV se aleja ligeramente del valor neutro. No obstante, estas áreas no dominan el recinto, lo que confirma que la probabilidad de insatisfacción térmica es baja en la mayor parte del espacio habitable.

Los valores promedio obtenidos de PMV y PPD, de 0.26 y 6.12 %, respectivamente, refuerzan esta tendencia y permiten concluir que el ambiente interior se mantiene dentro de condiciones de confort térmico aceptables, de acuerdo con la normativa establecida.[\[27\]](#).

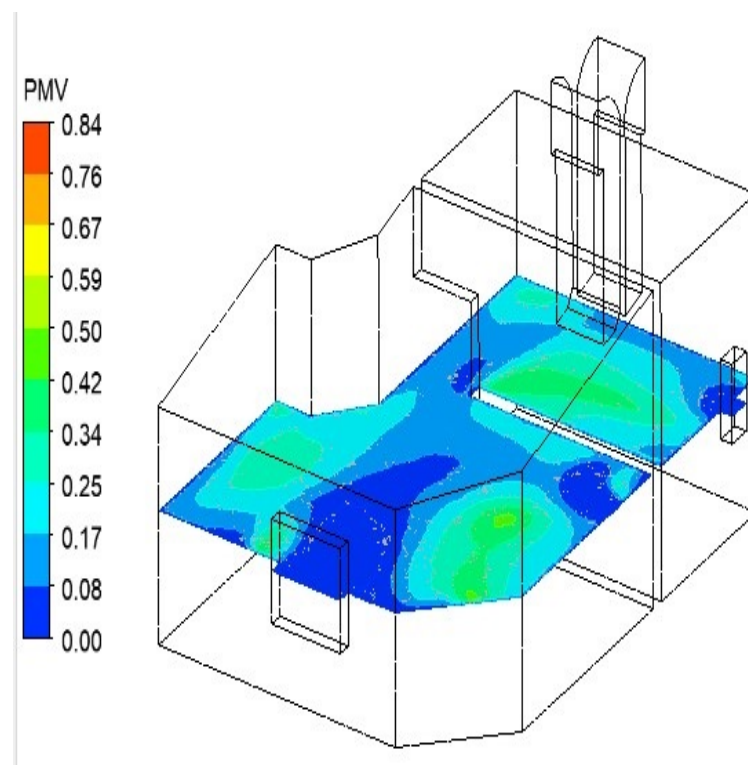


Figura 5.7 Campos de PMV con TV

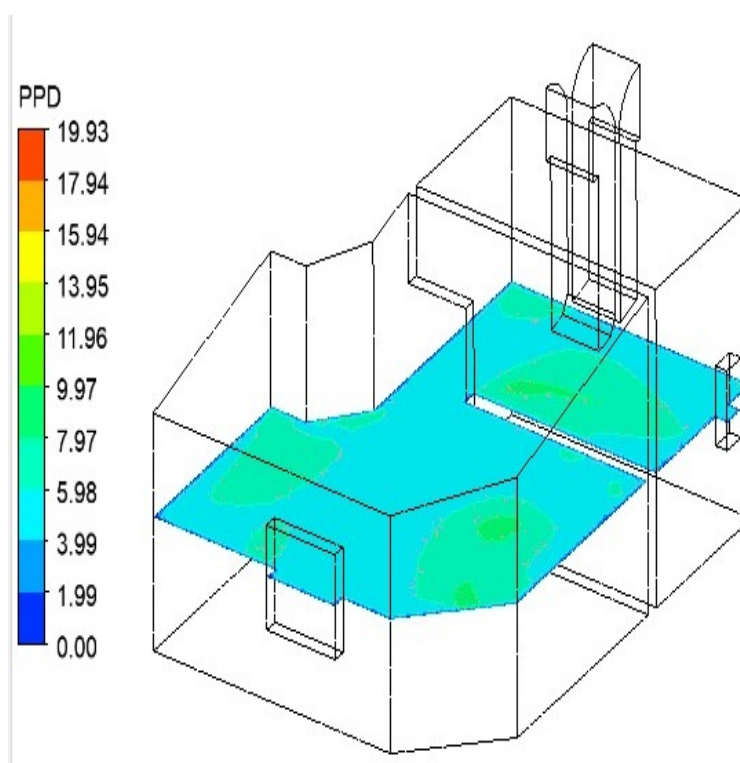


Figura 5.8 Campos de PPD con TV

5.4. Conclusiones

Los resultados de ventilación sin la aplicación de la TV muestran un valor de 31.37 ACH y de confort térmico de 0.66 para el PMV y 13.86 % para el PPD; por lo tanto, no se alcanza confort térmico ni ventilación adecuada. Por otra parte, al implementar un sistema pasivo de climatización como la TV, los resultados muestran una ventilación de 65.23 ACH, valor que se encuentra dentro del rango aceptable de 60–70 ACH. Asimismo, se obtienen índices de confort de 0.26 para el PMV y 6.12 % para el PPD; el primero se mantiene dentro del intervalo de -0.5 a 0.5 y el segundo es menor al 10 %, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa [27]. Estos resultados demuestran que la aplicación del sistema de TV genera tanto ventilación adecuada como confort térmico en la habitación.

Capítulo 6

Conclusiones generales y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Se presentan las conclusiones de a) los trabajos numérico-experimentales realizados en la habitación de estudio, y de b) los estudios numéricos sin/con TV para la misma habitación.

a) Estudios numérico-experimentales

El estudio experimental preliminar en una habitación de prueba corroboró el funcionamiento adecuado de todos los componentes para la captura y registro de datos. Se realizaron mediciones de temperatura, humedad relativa, y velocidad de viento, tanto en la habitación de prueba como en la habitación de estudio.

- La aplicación de Arduino para proyectos pequeños de investigación y experimentación en campo es confiable con la ventaja de generar una disminución significativa en los costos de materiales e instrumentos de medición en comparación con los de National Instrument.
- La captura de datos mediante el software PLX-DAQ permitió el registro continuo de información durante días completos sin presentar inconvenientes en su funcionamiento de información, con el apoyo de un No-Break.
- Los estudios numérico experimentales permitieron identificar la habitación más caliente de la casa (habitación de estudio).
- Las mediciones de temperatura y de velocidad de viento permitieron establecer las condiciones de frontera para la validación de la metodología numérica.
- Comparando los datos numérico-experimentales (validación) se obtuvo una diferencia

máxima de 0.47 °C, que está por debajo de la incertidumbre de los sensores que es de ± 0.5 °C de acuerdo con su ficha técnica. Esto indica que los datos numéricos reproducen satisfactoriamente los datos experimentales.

- El análisis de ventilación y de confort térmico realizado mediante la norma ASHRAE Standard, permitió establecer un ACH de 22.06 y valores de PMV y PPD para el confort térmico de 0.68 y 15 % respectivamente. Estos resultados corroboraron la necesidad de incorporar un TV a la habitación para propiciar mejores condiciones de confort.

b) Estudios numéricos del flujo de aire sin/con torre de viento

Se efectuaron simulaciones numéricas para establecer las condiciones de frontera aplicando la norma NOM-020-ENER-2011 sin/con TV.

- Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que el diseño de la TV aplicado mejoró de manera significativa tanto la distribución como la intensidad del flujo de aire en el interior de la habitación analizada. La incorporación de la torre de viento favoreció el ingreso del aire exterior y su conducción hacia las zonas ocupadas, reduciendo regiones de baja velocidad y promoviendo una ventilación más uniforme en comparación con la configuración sin TV.
- Los resultados de ventilación sin la aplicación de la TV muestran un valor de 31.37 ACH y de confort térmico de 0.66 para el PMV y 13.86 % para el PPD; por lo tanto, no se alcanza confort térmico ni ventilación adecuada. Por otra parte, al implementar el diseño TV, los resultados muestran una ventilación de 65.23 ACH, valor que se encuentra dentro del rango aceptable de 60-70 ACH. Asimismo, se obtienen índices de confort de 0.26 para el PMV y 6.12 % para el PPD; el primero se mantiene dentro del intervalo de -0.5 a 0.5 , y el segundo es menor al 10 %, cumpliendo con los límites establecidos por la normativa [27].
- De acuerdo con las conclusiones previas se establece que las TV constituyen un sistema eficiente de ventilación natural para propiciar mejores condiciones de confort térmico.

6.2. Recomendaciones para trabajos futuros

- Utilizar sistemas de captura de datos que no requieran un equipo de cómputo conectado en todo momento, existen otras versiones de sistemas de captura de datos con Arduino que simplifican este apartado agregando una tarjeta de memoria SD y un código fuente con otras características que sin duda simplificaría de manera significativa el sistema.
- Definir una buena arquitectura de software en los equipos para establecer simulaciones

que disminuyan los tiempos de cómputo.

- Proponer nuevos diseños de TV que se adapten a la arquitectura moderna y que complementen la estructura de las edificaciones.
- Aplicar el sistema de TV en una propiedad en México y realizar una evaluación por un periodo mínimo de un año para evaluar su comportamiento durante todas las estaciones y así conformar su funcionalidad y eficiencia bajo condiciones reales de operación.
- Conformer un diseño práctico de una TV que facilite su instalación en las viviendas, de esta manera se convertiría en un modelo de TV adaptable con la arquitectura actual generalizando su aplicación.

Productos obtenidos

Durante el programa de maestría se realizaron actividades de divulgación científica, las cuales son descritas a continuación:

Publicación de artículos

Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada
Volumen 5, Núm. 2, Julio - Diciembre 2022

ISSN en trámite

Estudio numérico y experimental de ventilación cruzada en una habitación de una casa del Estado de Morelos

E. G. Ortiz Salvador^{*1}, E. G. Ricoy Zárate*,
L. G. Carreto Hernández*, P. Sotelo Rodríguez*, S. L. Moya Acosta*, R. Campos Amezcua*

** Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP 62490, México*

¹(e-mail: m21ce002@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: Este artículo presenta un estudio numérico-experimental de la ventilación cruzada en una habitación de Cuernavaca, Morelos, México. Se evaluaron los cambios de aire por hora (ACH) y el confort térmico dentro de la habitación. Las simulaciones numéricas se realizaron con el software ANSYS Fluent. Para la obtención de datos del proceso experimental se realizó la construcción de una tarjeta adquisidora de datos desarrollada en el sistema Arduino, posteriormente se instrumentó la habitación bajo estudio. Los resultados del proceso experimental se utilizaron para validar los resultados numéricos de temperatura en tres puntos diferentes dentro de la habitación, obteniendo un porcentaje de desviación media de 0.26. Además, se encontró que los ACH fueron de 21.52, siendo adecuados ya que están por encima de los 20 ACH que recomienda la norma ASHRAE 62.2. Sin embargo, no se alcanzaron condiciones de confort térmico para los ocupantes. Se recomienda combinar la ventilación cruzada con otro sistema de ventilación natural.

Palabras clave: Ventilación cruzada, Confort térmico, CFD, Arduino.

Tecnología y Ciencia Aplicada
Volumen 6, Núm. 2, Julio - Diciembre 2023

ISSN: 2992-8338

Numerical study of the air capture effectiveness of a wind tower without/with inlet extensions

P. Sotelo Rodríguez *, L.G. Carreto Hernandez *, E. G. Ortiz Salvador *, R. Campos Amezcua*, S.L. Moya Acosta*

Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., CP 62490, México

(e-mail: m22ce035@cenidet.tecnm.mx).

Abstract: the modern world, there have been different problems related to the increase in electricity consumption, mainly due to global warming and population growth. Wind towers are a technology of great interest due to their ability to generate thermal comfort in buildings without the need to use electromechanical air conditioning equipment. In this work, a dynamic study of the air capture efficiency of 3 designs of entrance extensions in the windward window of a wind tower coupled to an experimental booth is presented. The extensions align the wind before entering the tower's catchment duct, increasing the induction of air inside the buildings, in this way greater natural ventilation is generated in relation to wind towers without entrance extensions. The wind conditions of Cuernavaca Mor., Mexico are considered. Border conditions were established by measuring wind speed by means of a weather station placed in the study area. It is concluded that the three entrance extensions increase the catchment efficiency of the wind tower by 11% on average, with a maximum of 18%.

Keywords: CAGETEV; CFD; Inlet extension.

Impartición de curso:

<https://tecmisantla.tech/cli2023/>



SOLUCIONES
INTERDISCIPLINARIAS PARA UN
**CAMBIO
GLOBAL**

El Instituto Tecnológico Superior de Misantla otorga la presente:

CONSTANCIA

TALLERISTA

AL: ING. ERICK GABRIEL ORTIZ SALVADOR

Por su destacado taller :

**MODELACIÓN DINÁMICA Y TÉRMICA PARA INGENIERÍA CON EL
SOFTWARE ANSYS-FLUENT**

En el marco del Congreso Internacional de Ingenierías 2023
"Soluciones Interdisciplinarias para un Cambio Global"
los días 16, 17 y 18 de Noviembre del 2023.

Mtro. Jorge Alberto Lara Gómez
Director General del Instituto Tecnológico
Superior de Misantla



CII CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍAS **2023**

EDUCACIÓN

TECNOLOGÍA NACIONAL DE MÉXICO

VERACRUZ GOBIERNO DEL ESTADO

SEV Secretaría de Educación

SEMSyS Subsecretaría de Educación Media Superior y Superior

DET Dirección de Educación Tecnológica

Impartición de conferencia:

LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DEL ESTADO DE GUERRERO

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A: ING. ERICK GABRIEL ORTIZ SALVADOR

Por su valiosa asistencia y participación en la Ponencia, en ciencias en ingeniería mecánica en el área de diseño térmico de edificaciones y sistemas solares relacionados en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), el día 28 Noviembre de 2022.

Dr. Mario Arturo Rivera Martínez

Rector



28 de Noviembre 2022



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TRANSFORMANDO
GUERRERO
GOBIERNO DEL ESTADO
2021 - 2027

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN

UTP
y
DIRECCIÓN GENERAL DE UNIVERSIDADES
TECNOLÓGICAS y POLITÉCNICAS



REFERENCIAS

- [1] Afshin, M., Sohankar, A., Manshadi, M. D., & Esfeh, M. K. (2015). An experimental study on the evaluation of natural ventilation performance of a two-sided wind-catcher for various wind angles. *Renewable Energy*, 85, 10681078. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.036>
- [2] Bahadori, M., Mazidi, M., & Dehghani, A. (2008). Experimental investigation of new designs of wind towers. *Renewable Energy*, 33(10), 22732281. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.12.018>
- [3] Bouchahm, Y., Bourbia, F., & Belhamri, A. (2011). Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate. *Renewable Energy*, 36(3), 898906. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.030>
- [4] Calautit, J. K., Tien, P. W., Wei, S., Calautit, K., & Hughes, B. (2019). Numerical and experimental investigation of the indoor air quality and thermal comfort performance of a low energy cooling windcatcher with heat pipes and extended surfaces. *Renewable Energy*, 145, 744756. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.040>
- [5] Dehghani-Sani, A., Soltani, M., & Raahemifar, K. (2014). A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 182195. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.018>
- [6] Flores Salas, L. (2018). *Estudio del flujo de aire en el edificio del CIICAp y viabilidad de incorporación de torre(s) de viento* [Tesis de maestría]. Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- [7] Francisco Hernández, A. (2021). *Estudio del efecto de una torre de viento con humidificación y de un sistema de aprovechamiento de fluido geotérmico de baja entalpía sobre el confort térmico de una casa habitación* [Tesis de maestría]. Tecnológico Nacional de México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- [8] FLUENT. (s.f.). *Users Guide 14*. Fluent Inc., EE. UU.

- [9] Kalantar, V. (2008). Numerical simulation of cooling performance of wind tower (Baud-Geer) in hot and arid region. *Renewable Energy*, 34(1), 246254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.03.007>
- [10] Hosseini, S. H., Shokry, E., Ahmadian Hosseini, A. J., Ahmadi, G., & Calautit, J. K. (2016). Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in Yazd City, Iran. *Energy for Sustainable Development*, 35, 724.
- [11] Moghaddam, N. B., Mousavi, S. M., Nasiri, M., Moallemi, E. A., & Yousefdehi, H. (2011). Wind energy status of Iran: Evaluating Iran's technological capability in manufacturing wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 42004211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.029>
- [12] Alazazmeh, A., & Asif, M. (2021). Commercial building retrofitting: Assessment of improvements in energy performance and indoor air quality. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 100946.
- [13] Nejat, P., Calautit, J. K., Majid, M. Z. A., Hughes, B. R., Zeynali, I., & Jomehzadeh, F. (2016). Wind tunnel and numerical data on the ventilation performance of windcatcher with wing wall. *Data in Brief*, 9, 448452. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.09.007>
- [14] Nejat, P., Ferwati, M. S., Calautit, J., Ghahramani, A., & Sheikhshahrokhdehkordi, M. (2021). Passive cooling and natural ventilation by the windcatcher (Badgir): An experimental and simulation study of indoor air quality, thermal comfort and passive cooling power. *Journal of Building Engineering*, 41, 102436. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102436>
- [15] Nasrollahi, N., & Ghobadi, P. (2022). Field measurement and numerical investigation of natural cross-ventilation in high-rise buildings: Thermal comfort analysis. *Applied Thermal Engineering*, 211, 118500.
- [16] Reyes, V., Moya, S., Morales, J., & Sierra-Espinosa, F. (2013). A study of air flow and heat transfer in building-wind tower passive cooling systems applied to arid and semi-arid regions of Mexico. *Energy and Buildings*, 66, 211221. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.032>
- [17] Reyes, V., Sierra-Espinosa, F., Moya, S., & Carrillo, F. (2015). Flow field obtained by PIV technique for a scaled building-wind tower model in a wind tunnel. *Energy and Buildings*, 107, 424433. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.047>
- [18] Sadeghi, M., Samali, B., Wood, G., & De Dear, R. (2019). Comfort cooling by wind towers in the Australian residential context: Experimental wind tunnel study of comfort. *Journal*

- of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 196, 104014. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104014>
- [19] Carreto Hernández, L. G., Moya, S. L., Varela-Boydo, C. A., & Francisco-Hernandez, A. (2022). Studies of ventilation and thermal comfort in different wind tower-room configurations considering humidification for a warm climate of Mexico. *Revista de Ingeniería de la Construcción*, 46.
- [20] Varela-Boydo, C., & Moya, S. (2019). Inlet extensions for wind towers to improve natural ventilation in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101933. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101933>
- [21] Varela-Boydo, C., Moya, S., & Watkins, R. (2020). Study of wind towers with different funnels attached to increase natural ventilation in an underground building. *Frontiers of Architectural Research*, 9(4), 925939. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.05.007>
- [22] Varela-Boydo, C., Moya, S., & Watkins, R. (2020b). Analysis of traditional windcatchers and the effects produced by changing the size, shape, and position of the outlet opening. *Journal of Building Engineering*, 33, 101828. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101828>
- [23] Zhang, H., Yang, D., Tam, V. W. Y., Tao, Y., Zhang, G., Setunge, S., & Shi, L. (2021). A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110795.
- [24] Morales, X., Sierra-Espinosa, F., Moya, S., & Carrillo, F. (2021). Thermal effectiveness of wind-tower with heated exit-wall and inlet-air humidification: Effects of winter and summertime. *Building and Environment*, 204, 108110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108110>
- [25] Santamouris, M., & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100002.
- [26] Zhang, X., Weerasuriya, A. U., Wang, J., Li, C. Y., Chen, Z., Tse, K., & Hang, J. (2022). Cross-ventilation of a generic building with various configurations of external and internal openings. *Building and Environment*, 2207(A), 108447.
- [27] ASHRAE Standard 55–62.2. (2020). Ventilation and acceptable indoor air quality in residential buildings.

- [28] ISO 7730. (2005). *Ergonomics of the thermal environment: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- [29] Estados Unidos Mexicanos - Secretaría de Energía. (2011). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones - Envoltante de edificios para uso habitacional*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf
- [30] ANSYS Fluent 12.0/12.1 Documentation. (2021). Recuperado el 10 de junio de 2025, de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm>
- [31] Xáman Villaseñor, J. P. X. V., & Gijón Rivera, M. G. R. (2015). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros* (1.a ed.). Palibrio.
- [32] Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., & Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- [33] Sámano Tirado, D., & Sen, M. (2009). *Mecánica de fluidos* (1.a ed., Vol. 1).
- [34] Bahadori, M. N., Dehghani-Sani, A., & Sayigh, A. (2014). *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05876-4>
- [35] Li, J., Calautit, J. K., & Jimenez-Bescos, C. (2023). *Experiment and numerical investigation of a novel flap fin louver windcatcher for multi-directional natural ventilation and passive technology integration*. *Building and Environment*, 242, 110429. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110429>
- [36] Liu, M., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2024). *Can windcatchers natural ventilation beat the chill? A view from heat loss and thermal discomfort*. *Building and Environment*, 247, 110916. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110916>
- [37] Calautit, J. K., Li, J., & Jimenez-Bescos, C. (2024). *Parametric analysis of a novel rotary scoop dual-channel windcatcher for multi-directional natural ventilation of buildings*. *Energy and Built Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.07.002>
- [38] Liu, M., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2022). *CFD investigation of a natural ventilation wind tower system with solid tube banks heat recovery for mild-cold climate*. *Journal of Building Engineering*, 45, 103570. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103570>

- [39] Sirror, H. (2024). *Innovative Approaches to Windcatcher Design: A Review on Balancing Tradition, Sustainability and Modern Technologies for Enhanced Performance*. *Energies*, 17(22), 5770. <https://doi.org/10.3390/en17225770>
- [40] Sotelo Rodríguez, P., Carreto Hernández, L. G., Ortiz Salvador, E. G., Campos Amezcua, R., & Moya Acosta, S. L. (2023). *Numerical study of the air capture effectiveness of a wind tower without/with inlet extensions*. En *Proceedings of the I CITCA 2023*. Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., México.
- [41] Arduino. (s. f.). *Arduino language reference*. <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [42] Justus, C. G., Mikhail, A. (1976). *Height variation of wind speed and wind distributions statistics*. *Geophysical Research Letters*, 3(5), 261264. <https://doi.org/10.1029/GL003i005p00261>
- [43] Ortiz Salvador, E. G., Ricoy Zárate, E. G., Carreto Hernandez, L. G., Sotelo Rodríguez, P., Moya Acosta, S. L., Campos Amezcua, R. (2022). *Estudio numérico y experimental de ventilación cruzada en una habitación de una casa del Estado de Morelos*. *JCyTA 2022*. Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Cuernavaca, Mor., México.
- [44] Oberkampf, W. L., Trucano, T. G. (2002). *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics*. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(3), 209272.
- [45] ASME (2009) *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*.